

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2014

Bc. Ľuboš Balala

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Modelovanie a simulácia pulzného meniča
napájaného z veternej elektrárne s DC
generátorom v programe Matlab-Simulink**

**Modelling and Simulation of Chopper
Supplied by Wind Energy System with DC
Generator in Matlab-Simulink**

2014

Bc. Ľuboš Balala

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ľuboš Balala**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T015 Elektronika

Téma: Modelování a simulace pulzního měniče napájeného z větrné elektrárny
s DC generátorem v programu Matlab-Simulink
Modelling and Simulation of Chopper Supplied by Wind Energy System
with DC Generator in Matlab-Simulink

Zásady pro vypracování:

1. Popis struktur větrné elektrárny s DC generátorem
2. Vytvoření matematického modelu větrné elektrárny s DC generátorem a pulzním měničem
3. Sestavení simulačního modelu větrné elektrárny s DC generátorem a pulzním měničem
4. Simulační ověření větrné elektrárny s DC generátorem a pulzním měničem

Seznam doporučené odborné literatury:

RYCHETNÍK, Václav. Větrné motory. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1995. ISBN 80-7078-281-1.
RYCHETNÍK, Václav, PAVELKA Jiří, JANOUŠEK Josef: Větrné motory a elektrárny. ČVUT Praha,
Ostrava, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
<http://www.mathworks.com/help/phymod/powersys/ref/windturbine.html>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Týmto prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne a uviedol som v nej všetky literárne pramene a publikácie z ktorých som pre jej tvorbu čerpal.

Dátum odovzdania : 7.5.2014

Podpis : Babala

Pod'akovanie:

Týmto by som sa chcel poďakovať doc. Ing. Ivovi Neborákovi, Csc., ktorý ma viedol pri spracovaní diplomovej práce, za cenné rady a čas strávený pri riešení problémov týkajúcich sa spracováanej problematiky.

Abstrakt:

Diplomová práca sa zaoberá v prvej časti stručným uvedením do problematiky veternej energetiky a využitia malej veternej elektrárne v ostrovnom režime. V nasledujúcej kapitole je uvedené základné rozdelenie a popis štruktúr malej veternej elektrárne, ich konfigurácia s použitím DC generátora. Hlavnou časťou práce je zameranie sa na jednu z popisovaných štruktúr malej veternej elektrárne a k nej vytvorenie matematického modelu. Na základe matematického popisu modelu bol zostavený simulačný model veternej elektrárne v programe Matlab-Simulink. Posledná časť práce sa týka simulačného overenia modelu veternej elektrárne, spracovania výsledkov a záverečného zhodnotenia.

Kľúčové slová: veterná turbína, DC generátor, prevodovka, pulzný menič, akumulátor, ostrovný režim

Abstract:

The diploma thesis deals in the first part with brief introduction to the issue of wind energy and the use of small wind power generator in the autonomous operation. In another chapter is a basic division and description of the structures of small wind power generator, their configuration with using a DC generator. The main part of the thesis is to focus on one of the described structures of small wind power generator and to create a mathematical model which will apply to chosen structure. The Simulation model of wind power generator in program Matlab-Simulink was created on the base of the mathematical description of the model. The last part of the thesis relates to the verification of the simulation model of wind power generator, results processing and final evaluation.

Keywords: Wind turbine, DC generator, gear case, pulse inverter, battery, autonomous operation

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Veličina	Jednotka	Význam
a pod.	[-]	a podobne
C	[F]	kapacita
$c\Phi$	[Vs]	konštanta motoru a magnetický tok
č.	[-]	číslo
DC	[V(A)]	Direct current/ voltage – jednosmerný(e) prúd/napätie
kap.	[-]	kapitola
L	[H]	indukčnosť
lit.	[-]	literatúra
obr.	[-]	obrázok
pu	[-]	per unit - pomerná jednotka
R	[Ω]	odpor
resp.	[-]	respektíve
tzn.	[-]	to znamená
pozn.	[-]	poznámka

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Popis štruktúr veternej elektrárne s DC generátorom.....	2
2.1.	Veterné motory	2
2.2.	Veterná elektráreň ako zdroj pre akumulčné vykurovanie , ohrev vody, pohon motorov	3
2.3.	Štruktúra veternej elektrárne ako zdroj pre nabíjanie akumulátorov	4
2.3.1.	Typy jednosmerných generátorov	6
3.	Matematický model veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom	10
3.1.	Matematický popis modelu veternej turbíny	10
3.2.	Matematický model jednosmerného generátora s cudzím buđením (permanentnými magnetmi)	14
3.3.	Matematický model jednokvadrantového zvyšujúceho pulzného meniča.....	18
3.3.1.	Návrh parametrov jednokvadrantového zvyšujúceho meniča	20
4.	Simulačný model veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom	22
4.1.	Simulačný model veternej turbíny	22
4.1.1.	Popis bloku Wind Turbine	22
4.2.	Zostavenie modelu pomocou dvojrozsmernej vyhľadávacej tabuľky	27
4.3.	Simulačný model jednosmerného generátora s permanentnými magnetmi	31
4.4.	Simulačný model prevodovky	32
4.5.	Simulačný model jednokvadrantového pulzného meniča	32
4.6.	Simulačná štruktúra veternej turbíny s DC generátorom a pulzným meničom	34
5.	Simulačné overenie veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom	35
5.1.	Simulačné overenie pre štruktúru veternej turbíny s meničom a R záťažou	35
5.2.	Simulačné overenie pre štruktúru veternej turbíny s meničom a akumulátorom	39

6. Záver	45
Literatúra.....	47
Zoznam príloh	49

1. Úvod

Energia vetra je formou slnečnej energie, ktorá vzniká pri nerovnomernom ohrievaní zemského povrchu. Využívanie veternej energie neprodukuje žiadne odpady, neznečisťuje ovzdušie a nemá negatívny vplyv na zdravie ľudí. Vietor ako primárny zdroj energie je zadarmo. Prúd vzduchu pôsobí na listy veternej turbíny kde vzniká aerodynamická sila, ktorá roztáča generátor, ktorý vyrába elektrinu [1]. Preto je veterná elektrická energia veľmi sľubný prírodný zdroj energie. Veľké veterné elektrárne s výkonom v jednotkách megawattov majú zrejme výhody oproti malým veterným systémom, a to hlavne v ekonomickej oblasti. Veľké veterné turbíny sa väčšinou používajú vo veľmi špecifických a zvyčajne vzdialených oblastiach, ktoré splňujú požadované kritéria a počítajú s dostupnosťou a možnosťou pripojenia na existujúce prenosové vedenie.

Malé veterné turbíny sa vo svete využívajú väčšinou ako samostatné energetické zdroje. V niektorých prípadoch sú však aj tieto malé systémy pripájané na verejnú elektrickú sieť, čo umožňuje majiteľovi takéhoto systému znížiť náklady na nákup elektriny a súčasne v prípade prebytku dodávať ním vyrobenú elektrinu do siete. Odber a dodávanie do siete sa vykonáva pomocou automatických prepínačov.

Samostatne pracujúce malé veterné systémy sa uplatňujú v osamotených domoch (vzdialených od siete), v člnoch, na farmách alebo tiež v malých obciach. Každý takýto systém môže byť nielen praktický, ale aj ekonomický pre užívateľa. Tieto systémy majú veľký význam aj pre rozvojové krajiny s nízkou úrovňou infraštruktúry a riedkou sieťou elektrických vedení, ktoré vzhľadom na nedostatok financií budú len veľmi ťažko dobudované. Pre milióny ľudí v rozvojových krajinách sú jednoduché a lacné malé veterné turbíny ideálnym riešením. Takéto turbíny sú v súčasnosti vyrábané viacerými firmami v širokom rozsahu výkonov od niekoľkých wattov do niekoľko tisíc W. Malá veterná turbína s výkonom od 100 do 500 W je na dobrom veternom mieste (s priemernou rýchlosťou vetra viac ako 5 m/s) schopná veľmi lacno dodávať energiu do batérie a následne zabezpečovať energiu napr. na osvetlenie, napájanie elektrospotrebičov ako sú rádio alebo televízor. V minulosti (začiatkom 70-tých rokov) bola spoľahlivosť týchto turbín problematická. V súčasnosti sú však na trhu turbíny, ktoré vydržia aj tie najdrsnejšie podmienky a vyžadujú si minimálnu údržbu (raz za 5 rokov).

Používanie malých veterných turbín sa pre izolovaných užívateľov ukázalo výhodnejšie ako používanie napr. naftových generátorov alebo predlžovanie elektrického vedenia. Výhodou je, že veterné systémy sú nielen relatívne malé, ale je ich možné rýchlejšie vybudovať. Platí to pre miesta, kde rýchlosť vetra v ročnom priemere presahuje 4 m/s. [2]

Nasledujúca kapitola sa zaoberá popisom štruktúr malej veternej elektrárne s jednosmerným generátorom v spojení s pulzným meničom. V kapitole č. 3 je spracovaný matematický popis štruktúry malej veternej elektrárne. Kapitola č. 4 sa zaoberá zostavením simulačných modelov jednotlivých častí veternej elektrárne s jednosmerným generátorom a pulzným meničom. Výsledkom je celková štruktúra, ktorej simulačné overenie pomocou programu Matlab - Simulink je obsahom záverečnej kapitoly č. 5.

2. Popis štruktúr veternej elektrárne s DC generátorom

2.1. Veterné motory

V súčasnosti je vyvinuté a prevádzkované veľké množstvo rôznych veterných motorov, ktoré možno rozdeliť podľa rôznych kritérií. Z pohľadu pre základný popis malej veternej elektrárne by mohlo byť hlavným kritériom rozdelenie podľa koncepcie uloženia rotoru, a to nasledovne (obrázok č. 1) [3]:



Obr. 1: Ukážka horizontálneho a vertikálneho veterného motoru [3]

- **Veterné elektrárne s vertikálnou (zvislou) osou rotácie (VAWT)**

V praxi sa tento typ elektrárni príliš neuplatnil (vzor Darrieus a Savonius), pretože u nich dochádza k omnoho vyššiemu dynamickému namáhaniu, ktoré významne znižuje ich životnosť. Ďalšou nevýhodou je umiestnenie rotoru v malej výške nad terénom, čo má za následok to, že nedokážu využiť väčšie rýchlosti vetra. Veterné elektrárne s vertikálnou osou rotácie nie sú vyrábané na taký menovitý výkon ako veterné elektrárne s horizontálnou osou rotácie. Dôvodom sú významné priestorové nároky na veterný motor a obrovské nároky na mechanickú pevnosť stožiarov. Ich veľkou výhodou je však nižšia rýchlosť otáčania, nižší hluk, vyššia účinnosť a nezáleží u nich na smere vetra. Z týchto dôvodov sú preto využívané veterné elektrárne s vertikálnou osou rotácie pre menšie aplikácie, kde už nie je nutný veterný motor s veľkým priemerom. Jedným z možných využití veterných elektrární s vertikálnou osou rotácie sú ostrovné systémy pre napájanie elektrických spotrebičov malých výkonov. [3], [4]

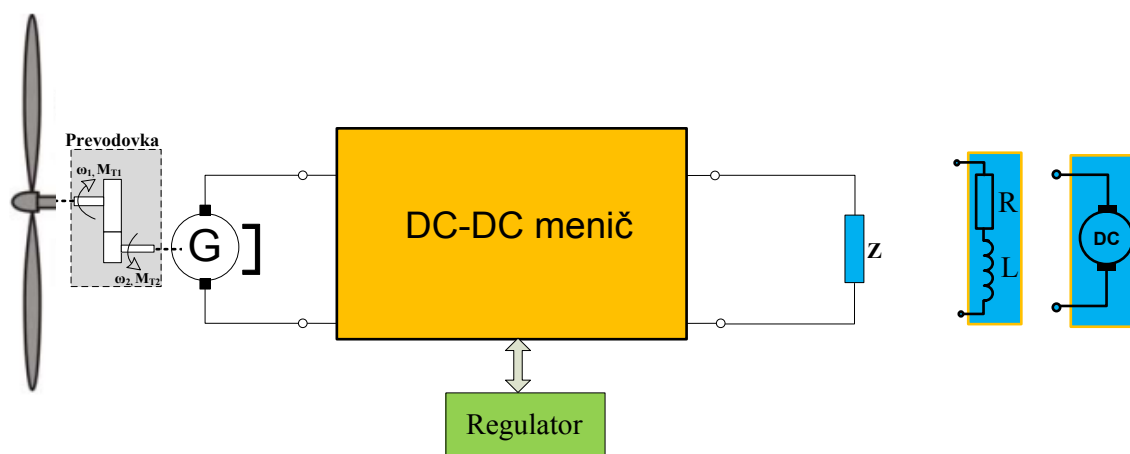
• Veterné elektrárne s horizontálnou osou (vodorovnou) osou rotácie (HAWT)

Tento typ elektrární je v súčasnej dobe najrozšírenejší, v prevedení s tromi listami vrtule a menovitým výkonom okolo 2 až 3 MW pre inštaláciu na pevnine. Rotor je umiestnený rovnobežne so zemou, a jeho os je rovnobežná s prúdením vzduchu. Celo turbína býva umiestnená vysoko nad zemou, čo má viacero výhod aj nevýhod. Ďalšou významnou výhodou je vyššia účinnosť. [3], [4]

V nasledujúcej časti sa budeme zaoberať popisom štruktúr málo výkonovej elektrárne s DC generátorom a s horizontálnou osou rotácie (HAWT). Budeme uvažovať o prevádzke v ostrovnom režime, resp. bez možnosti pripojenia k rozvodnej sieti (grid – off systém). Takýto systém je nezávislý na rozvodnej sieti a pracuje ako autonómny systém slúžiaci objektom, ktoré nemajú možnosť sa pripojiť k rozvodnej sieti. Tieto elektrárne môžeme využívať nasledovne [4]:

2.2. Veterná elektráreň ako zdroj pre akumuláciu vykurovanie , ohrev vody, pohon motorov

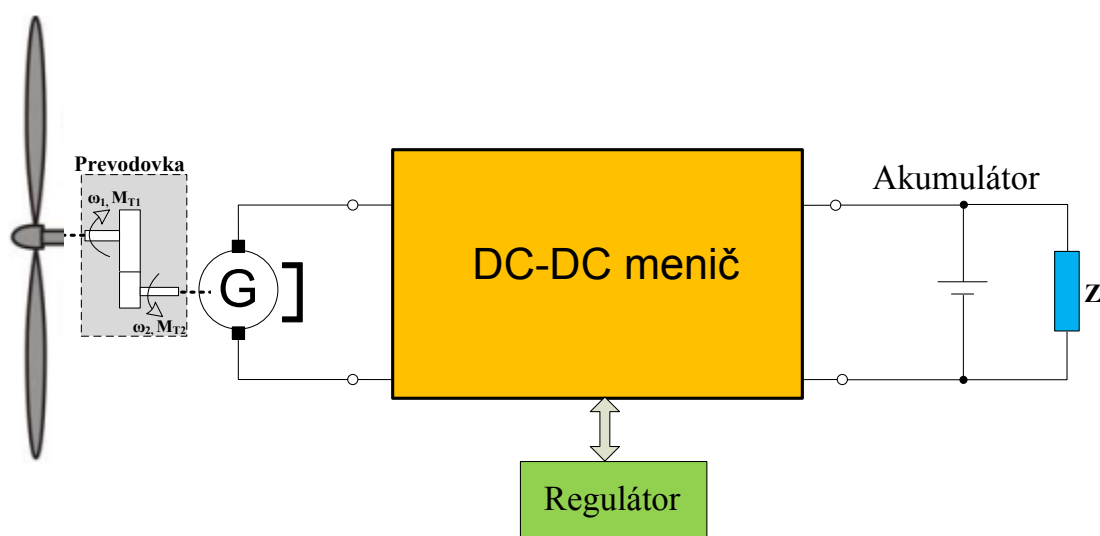
Tento spôsob zapojenia sa väčšinou využíva pre veterné elektrárne s výkonom vyšším než 3kW a priemerom rotoru vrtule od 3 m do 8 m. Výstupné generované napätie sa môže pohybovať v rozmedzí 48V až 230V. Kvôli nestálosti rýchlosti vetra a tiež z ekonomického hľadiska a efektívneho využitia energie ich nemôžeme použiť k napájaniu bežných elektrospotrebičov, ale takto vyrobená energia sa ukladá vo forme tepla vyhrievaním akumulčných vložiek vykurovacích pecí alebo ohrevom vody. [4], [9]



Obr. 2: Štruktúra veternej elektrárne ako zdroj pre akumuláciu vykurovanie , ohrev vody, prípadne pre pohon motorov

2.3. Štruktúra veternej elektrárne ako zdroj pre nabíjanie akumulátorov

Tento spôsob zapojenia sa využíva predovšetkým pre elektrárne s výkonom približne od 300 W do 5 kW a priemerom rotoru vrtule od 0,5 m do 3 m. Vyrobená elektrická energia sa ukladá v akumulátore a kedykoľvek neskôr môže byť využitá v podobe rozvodu jednosmerného prúdu s nízkym napätím (12V alebo 24V) pre osvetlenie alebo iný spotrebič. Ďalej je možnosť využiť túto energiu z elektrárne k napájaniu spotrebičov s napätím 230V, podmienkou je ale zapojenie príslušného meniča. [4], [9]



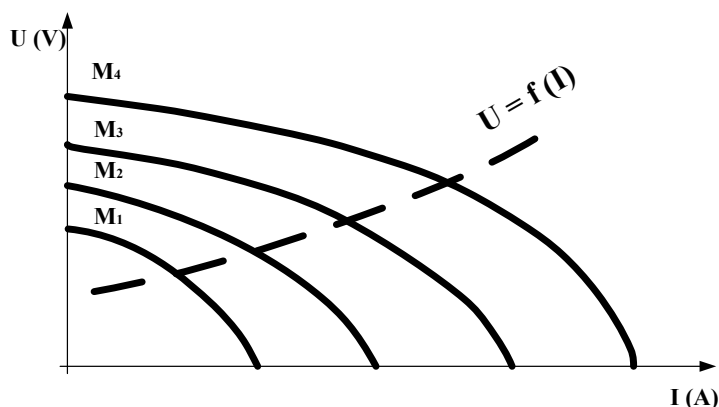
Obr. 3: Štruktúra veternej elektrárne ako zdroj pre nabíjanie akumulátorov

Celá štruktúra malej veternej elektrárne s DC generátorom je na obrázku č. 3. Pozostáva z turbíny, jednosmerného generátora, pulzného meniča a záťaže. Záťaž tvorí akumulátor a k nemu paralelne radená záťaž Z . V tomto systéme turbína poháňa generátor, ktorý generuje jednosmernú energiu, ktorá vstupuje do meniča a následne do záťaže. Turbína je pripojená cez prevodovku na jednosmerný generátor. Zvyšujúci pulzný menič zabezpečuje konštantné napätie na výstupe, pre prípad, že dôjde k zmene rýchlosti vetra a tým k poklesu otáčok a napätia na výstupe generátora. [4], [9]

Pri riešení takejto konfigurácie je možné vychádzať z charakteristík veternej turbíny a k nim priradenéj zaťažovacej charakteristiky generátora pripojeného k záťaži. Vychádza sa pritom z charakteristík generátora, tzn. zo vzájomnej závislosti napätia a prúdu pri rôznych otáčkach (pozri obrázok č. 4), do ktorých je zakreslená charakteristika pripojených spotrebičov (v obrázku

čiarkovane zaznačená). Z nej možno vypočítať potrebný výkon na svorkách generátora a výkon, ktorý musí dodávať veterný motor, zväčšený o všetky straty v generátore a v jeho pohone. [5]

Charakteristika závislosti požadovaného výkonu na otáčkach, vynesená v diagrame s výkonovými charakteristikami veternej turbíny pri rôznych rýchlostiach vetra v závislosti na otáčkach, môže slúžiť ako podklad pre stanovenie prevodového pomeru medzi rotorom veterného motoru a generátora. Ten musí byť taký, aby v tomto pomere prepočítaná charakteristika požadovaného výkonu čo najviac súhlasila s maximálnym výkonom veternej turbíny pri rôznych veterných režimoch. I v tomto prípade sa prihliada nato, či je hlavnou úlohou maximálne využitie energie vetru, a teda dosiahnutie maximálnej účinnosti premeny veternej energie, alebo zaistenie maximálneho výkonu pri nižších rýchlostiach vetra a využitie i horších veterných podmienok s tým, že pri vyšších rýchlostiach vetra nie je výkon naplno využitý. Veľkosť prevodového pomeru je daná merítkom, ktorým sa násobí dĺžka na súradnicovej ose otáčok pri prepočte charakteristiky.



Obr. 4: Charakteristiky generátora

V sústave s elektrochemickým akumulátorom a záťažou sa najčastejšie používajú generátory jednosmerného prúdu. Pretože nabitý akumulátor má určité napätie, nemôže byť veterný motor do obvodu s ním pripojený skôr, než napätie na jeho svorkách dosiahne napätie akumulátoru. Splnenie tejto požiadavky je zabezpečené pomocou meniča, ktorý by mal byť doplnený ochranou, ktorá chráni akumulátor proti vybíjaniu cez generátor veternej turbíny pri nízkej rýchlosti vetra. [9]

Závislosť napätia U na veľkosti nabíjacieho prúdu I sa riadi vzťahom

$$U = U_o + RI \quad (1)$$

Pri vybíjaní akumulátoru nadobúda prúd I záporné hodnoty. Podľa rovnakého vzťahu sa mení napätie aj u jednosmerného motora.

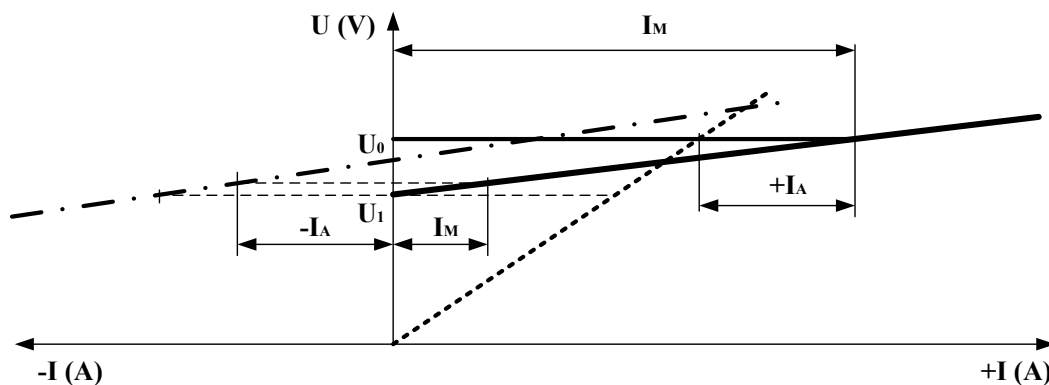
Ak záťaž tvorí iba elektrický odpor R , potom

$$U = RI \quad (2)$$

Uvažovanie celej sústavy s akumulátorom a rôznou záťažou ako celku, je potrebné pri jednotlivých napätiach sčítať zaťažovacie prúdy

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (3)$$

a po ich vynesení do diagramu (čiarkovaná čiara) a charakteristika akumulátoru (bodkočiarkovaná čiara) sa získa výsledná charakteristika sústavy (plná čiara) (pozri obrázok č. 5)



Obr. 5: Výsledná charakteristika sústavy s akumulátorom

V priesečníku plnej čiary so zvislou osou ($I = 0$) je všetka spotreba krytá z akumulátora pri napätí U_1 . Stupne však napätie na svorkách veternej elektrárne nad hodnotu U_1 , začína časť spotreby hradíť veterná elektrárňa, časť spotreby ešte zaisťuje akumulátor v pomere $I_M/-I_A$. Stupne však napätie na svorkách veternej elektrárne na menovitú hodnotu napätia nezaťaženeho akumulátora U_0 , prestáva sa akumulátor vybíjať a všetku spotrebu elektrickej energie hradí veterná elektrárňa. Pri napätí vyššom než U_0 je časť výkonu využitá na nabíjanie akumulátora (označená $+I_A$), druhá časť kryje celkový výkon zapnutých spotrebičov. [9]

2.3.1. Typy jednosmerných generátorov

V štruktúre malej veternej turbíny sa používajú generátory resp. dynamá na premenu veternej energie na energiu elektrickú. Vyrábajú iba jednosmerný prúd a to pre nabíjanie batérií (výroba striedavého prúdu by v tomto výkonovom pásme bola príliš nákladná). Preto práve na tento účel môžeme použiť viac typov generátorov resp. dynám:

Generátor s cudzím buzením

U takýchto generátorov budiace vinutie nie je prepojené s vinutím kotvy. Budiaci prúd je dodávaný z cudzieho zdroja, napr. zo sieťového zdroja s usmerňovačom alebo z batérie. Pri zaťažení klesá vyrábané napätie oproti napätiu naprázdno, vplyvom odporu vinutia kotvy.

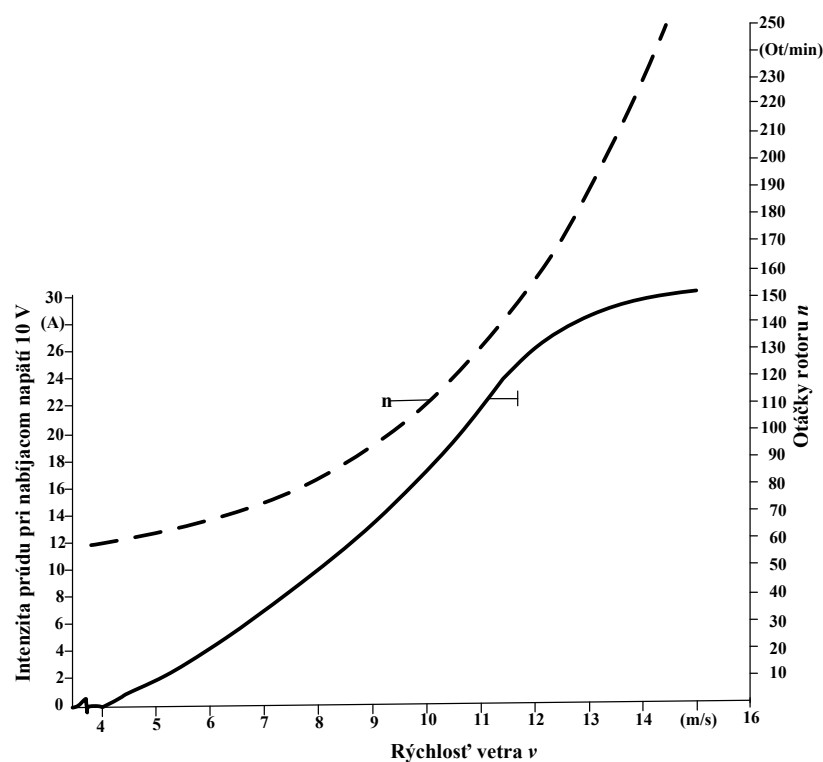
Regulácia napätia sa vykonáva so zmenou budiaceho prúdu a to elektronicky alebo sériovým regulačným odporom.

Tento typ generátoru však prakticky neuspel, pretože spotrebuje oveľa viac energie na vybudenie, než koľko jej potom dôkaze vyrobiť.

Boli rôzne pokusy o previnutie statoru jednosmerného dynama s tenším a výrazne dlhším drôtom pre dosiahnutie požadovaného nabudovacieho napätia, ale pritom klesá intenzita prúdu a maximálny výkon. [6], [7], [8], [9], [10]

Viacpólový generátor

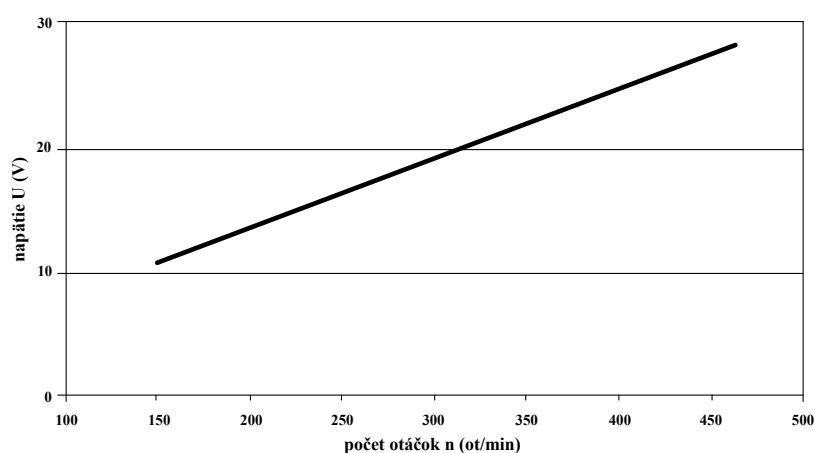
Ako ďalší možný generátor pre malé veterné turbíny je možné použiť viacpólový generátor, ktorý sa javí zatiaľ ako najvýhodnejšie riešenie. Je konštruovaný pre nízke otáčky. Pre tieto účely sú použiteľné generátory s minimálne 6 alebo 8 pólmi. Existujú však experimentálne zostavené generátory s 32 alebo dokonca 72 pólmi, ktoré sú priamo poháňané turbínou, teda bez použitia prevodovky. Kvôli extrémne nízkym otáčkam sú samozrejme dosť veľké, ťažké a materiálovo náročné. Tento typ generátoru vyvinula centrála pre veternú energiu („Windkraftzentrale“) pre 12 V jednosmerné napätie a prúd s menovitým výkonom 300 W. Na prevádzku zariadenia musíme zabezpečiť budenie. Na nasledujúcom obrázku číslo 6 vidíme, že tento typ generátora začína vyrábať prúd už pri nízkych otáčkach a malej hodnote rýchlosti vetra, presne 4 ms^{-1} . [6], [7], [8], [9], [10]



Obr. 6: Charakteristika viacpólového generátora [10]

Generátory s permanentnými magnetom

Tieto stroje sú z hľadiska pohonu relatívne bezproblémové a dosahujú dobrú účinnosť i pri prevádzke s čiastočným zaťažením. U generátorov s permanentnými magnetmi nám odpadá spotreba prúdu budiacim vinutím, ktorá pri nízkych otáčkach generátora môže byť vyššia než vyrobená užitočná energia. Na rozdiel od generátorov s vlastným alebo kondenzátorovým budením, u ktorých sa magnetické pole dostatočne silne pre výrobu užitočného prúdu vytvára až od určitých, relatívne vysokých otáčok, dodávajú generátory s permanentnými magnetmi napätie a prúd už pri nízkych otáčkach. Ak sa svorky generátoru skratujú, napríklad s ampérmetrom, tak je vidieť, ako ťažko sa dá otáčať hriadeľov a koľko sily vyžaduje výroba prúdu. Intenzita prúdu a napätia je lineárne závislá na otáčkach u generátora s permanentnými magnetmi (pozri obrázok č. 7) [6], [7], [8], [10]



Obr. 7: Lineárna závislosť napätia na otáčkach u generátora s permanentnými magnetmi

Napätie a intenzita prúdu závisí nielen na otáčkach, ale tiež na intenzite magnetického poľa, počte pólov a počte závitov vinutia vyrábajúceho prúd.

V súčasnej dobe u motorov a generátorov s permanentnými magnetmi sa používajú technológie spekaných magnetov. Tieto trvale magnety sa vyrábajú z kovového prášku stlačením a spekaním alebo liatím za použitia umelého pojiva (napr. pryskyrica). Výsledné tvary môžu byť ľubovoľné – napr. tyče, dosky, prstence,isky). Vyznačujú sa veľkou magnetickou silou a malými stratami z odmagnetizovania.

Jednosmerné generátory s permanentnými magnetmi môžu fungovať tiež aj ako motory. Väčšina z nich je koncipovaná a používaná práve ako motor. Pre použitie ako súčasť malej veternej turbíny je dôležitá výkonová oblasť 100 až 1500 W. Používajú sa predovšetkým servomotory pre priemyselné zariadenia a pre vojenskú techniku, a tiež akumulátorom hnané lodné prívesné elektromotory, hlavne preto, že počet otáčok odpovedá lineárnej hodnote priloženého napätia (pozri

obrázok č. 7). Servomotory sú väčšinou dimenzované pre väčšie jednosmerné napätia až do 70 V, dávajú tieto stroje vo funkcii generátoru užitočné napätie už pri nízkych otáčkach, čo je veľmi vyhovujúce pre aplikáciu malej veternej turbíny.

Z vyššie uvedených motorov, respektíve generátorov jednosmerného prúdu, sú miskovité permanentné magnety upevnené na stabilnom kryte, zatiaľ čo prúd je vyrábaný v rotujúcej kotve. Z toho dôvodu je nutný komutátor, ktorý odvádza vyrobený jednosmerný prúd cez uhlíkové kefy na svorkovnicu. Výhodou je ľahká dostupnosť týchto motorov v rôznych veľkostiach, resp. výkonoch, naopak nevýhodou je opotrebovanie a obrusovanie uhlíkov. [6], [7], [8], [10], [11]

3. Matematický model veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom

V tejto kapitole sú definované matematické modely jednotlivých častí veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom. Podľa zadania je teda modelovaná elektráreň podľa štruktúry určenej pre dobíjanie akumulátorov. Popis tejto topológie je uvedený v predchádzajúcej kapitole.

3.1. Matematický popis modelu veternej turbíny

Veterné turbíny sa používajú k premene kinetickej energie vetru na mechanickú prácu. Základný princíp funkcie spočíva v tom, že spomaľujú prúd vzduchu, ktorý preteká pracovnou plochou turbíny. K tomu, aby sa využila celková kinetická energia vetra, muselo by sa prúdenie vzduchu spomaliť na nulovú rýchlosť, čo však nie je možné. Ak sa však pôvodná rýchlosť vetra spomalí na tretinu, dochádza k maximálnej efektívnosti využívania dostupného výkonu. Táto hodnota využiteľného výkonu, 59,3%, je definovaná ako Betzov výkonnostný koeficient. Tento koeficient, nazývaný „power factor (c_p)“ výkonový koeficient. Jedná sa o veličinu, ktorá sa udáva v prospektoch k veterným elektrárnam a vyjadruje ich maximálnu účinnosť, tzn. akú veľkú časť veternej energie dokážu využiť. Najmodernejšie veterné motory navrhnuté na hranicu fyzikálnych možností sú schopné využívať maximálne 50% výkonu vetra za optimálnych podmienok. [5]

Nasledujúca rovnica definuje výkon veternej turbíny pre danú rýchlosť vetru v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$):

$$P_T = c_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (4)$$

kde c_p výkonový činiteľ turbíny
 ρ hustota vzduchu (kg m^{-3})
 S plocha turbíny (m^2)
 v rýchlosť vetra ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Výkonový súčiniteľ je závislý na uhle natočenia lopatiek vrtule a rýchlostného koeficientu. Nasledujúca rovnica vyjadruje túto závislosť a vychádza z použitej literatúry k programu Matlab - Simulink, knižnice pre simuláciu veternej turbíny a tiež z literatúry [12]

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (5)$$

λ rýchlostný činiteľ, pomer obvodovej rýchlosti rotoru ku rýchlosti vetra

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (6)$$

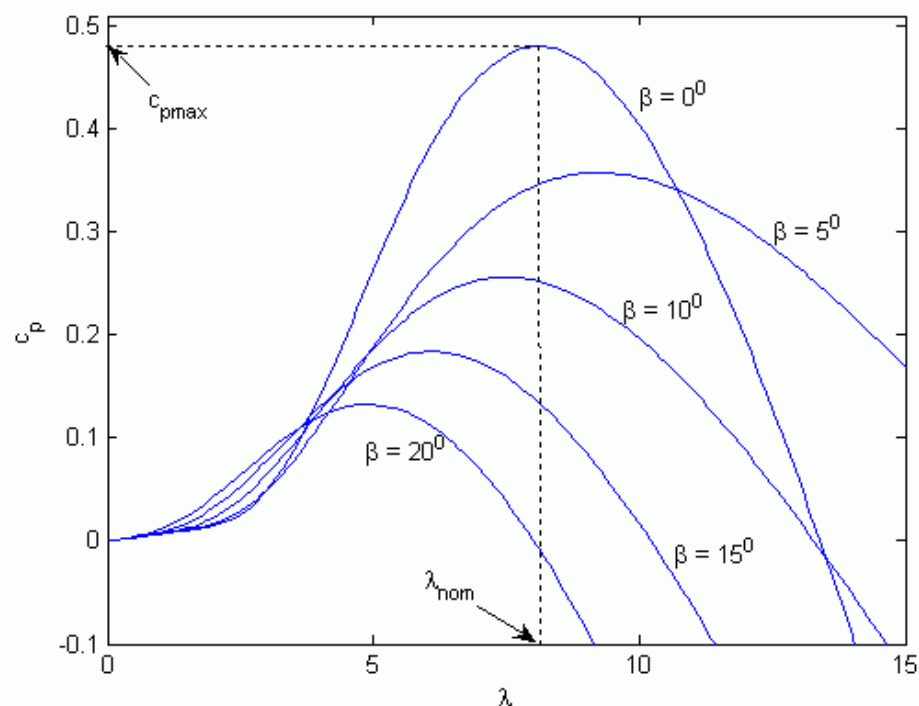
β Uhol natočenia lopatiek vrtule ($^{\circ}$)

kde

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + 0,08\beta - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad (7)$$

Hodnoty koeficientov sú nasledovné, c_1 až c_6 ($c_1 = 0,5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0,4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ a $c_6 = 0,0068$). [12]

Za pomoci týchto koeficientov môžeme vypočítať c_p a následne vykresliť charakteristiky výkonového súčiniteľa c_p v závislosti na uhle natočenia lopatiek vrtule β a rýchlostného koeficientu λ . Táto charakteristika je nasledujúca:



Obr. 8: Charakteristiky výkonového súčiniteľa c_p v závislosti na uhle natočenia lopatiek vrtule β a rýchlostného koeficientu λ . [12]

Maximálna hodnota c_p ($c_{pmax} = 0,48$) je dosiahnutá pri nulovom uhle natočenia lopatiek turbíny $\beta = 0^{\circ}$ a pri hodnote rýchlobežnosti $\lambda = 8,1$, kde táto hodnota je definovaná ako nominálna hodnota λ_{nom} .

Výsledný mechanický moment M_T je daný podielom výkonu P_T a rýchlosti otáčania ω rotoru.

$$M_T = \frac{P_T}{\omega} \quad (8)$$

Uvedený matematický popis sa týka modelu bloku *wind turbine* z knižnice *simpowersystems* programu Matlab-Simulink (lit. [12]). Jedná sa o všeobecný popis veternej turbíny. Následne si uvedieme ďalšiu možnosť popisu veternej turbíny a možnosti získania závislosti pracovného momentu stroja $M_p = f(v, n)$ z reálnych parametrov veternej turbíny. Získanie tejto závislosti nie je predmetom práce a preto využijeme závislosť pracovného momentu turbíny uvedenú v literatúre [17]. V nasledujúcom texte je ďalej popis získania a analýzy riešenia a výpočtu pracovného momentu veternej turbíny podľa lit. [17], [18].

Analýza je časovo veľmi náročná, pretože je potrebné riešiť spektrum rýchlosti a otáčok. Preto je veľkosť momentu na hriadeli rotoru určená pri pevne definovaných otáčkach – n_x , čím sa určí veľkosť pracovného momentu – M_p . Veľkosť tohto momentu M_p je závislá nielen na rýchlosti vetra – v , ale tiež na veľkosti otáčok n_x .

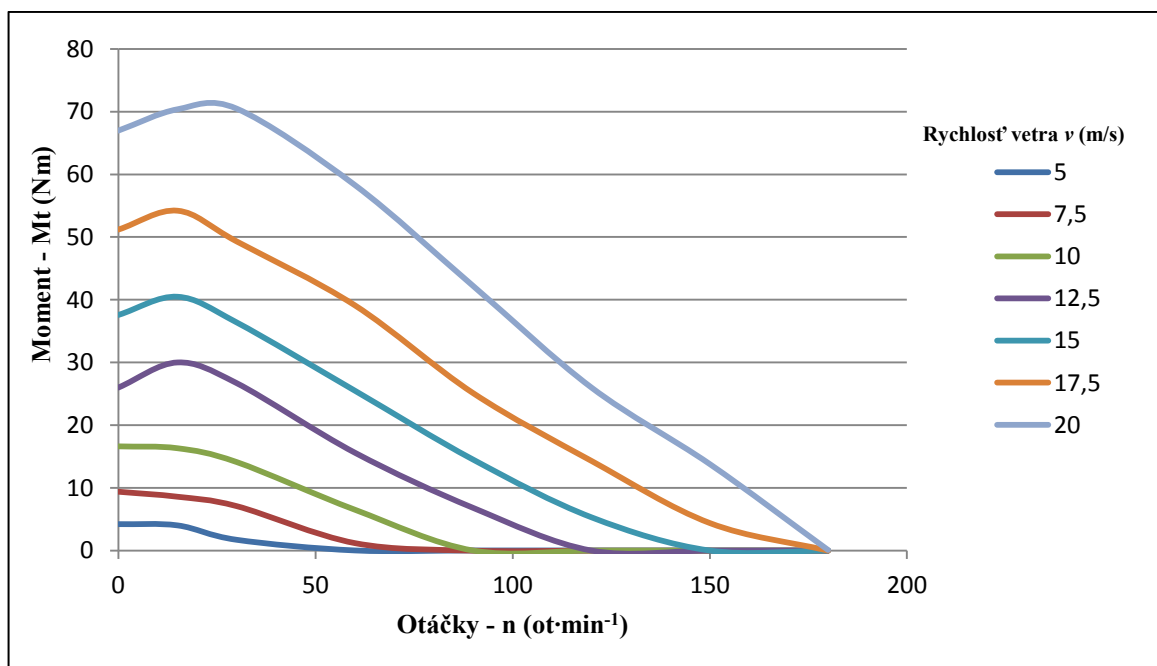
Pri počiatočnom rozbehu veternej turbíny z kľukového stavu záberovým momentom – M_z dochádza k urýchľovaniu otáčavého pohybu lopatiek, turbína koná prácu – W_T a jej výkon sa prenáša na hriadeľ generátora. Pri otáčaní rotoru však v rovnakom okamihu moment veternej turbíny klesá, dochádza totiž k relatívnemu pohybu lopatiek voči toku média (vetra). Pokiaľ je dostatok výkonu na hriadeli, otáčky ďalej rastú a ustávajú sa na hodnote odpovedajúcej rovnovážnemu stavu výkonu veternej turbíny – P_T a požadovaného príkonu generátora – P_G na hriadeli. Riešiť takúto komplexnú problematiku by bolo možné iba s uvažovaním všetkých mechanických konštánt veternej turbíny vrátane elektromagnetických konštánt generátora a jeho obvodu záťaže.

Aby sa dospelo k jednoduchšiemu riešeniu je potrebné eliminovať časovú závislosť tak, že je vypočítaná veľkosť pracovného momentu – M_p rotoru veterného motoru pre preddefinované brzdné otáčky – n_B . Postupným výpočtom jednotlivých zaťažovacích bodov sú získané parametrické závislosti momentu veternej turbíny – M_T pri zvolených otáčkach – n a definovanej rýchlosti vetra – v , vo vzťahu – $M_T = f(n, v)$. Čím viac je týchto bodov analyzovaných, tým presnejšie sú určené výsledné výkonové charakteristiky veternej turbíny $P_T = f(v)$.

Tab. 1: Závislosť momentu M_T na otáčkach rotoru n [17]

n/v	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
0	4,2	9,4	16,6	26	37,6	51,2	67
15	4	8,6	16,3	30	40,5	54,2	70,4
30	1,7	7,1	14,1	26,7	36,4	49,3	70,5
60	-	1,2	6,5	15,6	25,5	39,1	58,3
90	-	-	-	6,8	14,5	25,1	42,2
120	-	-	-	-	5,3	14,3	26
150	-	-	-	-	-	4,4	13,8
180	-	-	-	-	-	-	0,1

Uvedená tabuľka č. 1 ukazuje ako sa v závislosti na otáčkach rotoru mení veľkosť momentu veternej turbíny – M_T . Mínusové značky v tabuľke znamenajú, že moment má zápornú hodnotu a rotor v tom okamihu prechádza do motorického stavu, energia vetra sa nepredáva lopatkám vrtule, ale naopak. Konkrétne hodnoty záporného momentu nie sú známe, preto tieto hodnoty nebudú brané v úvahu a budú nahradené za nulové hodnoty. Motorický stav nebude zohľadnený v modeli. Nasledujúci obrázok č. 9 zobrazuje momentové charakteristiky veternej turbíny v ustálenom stave.

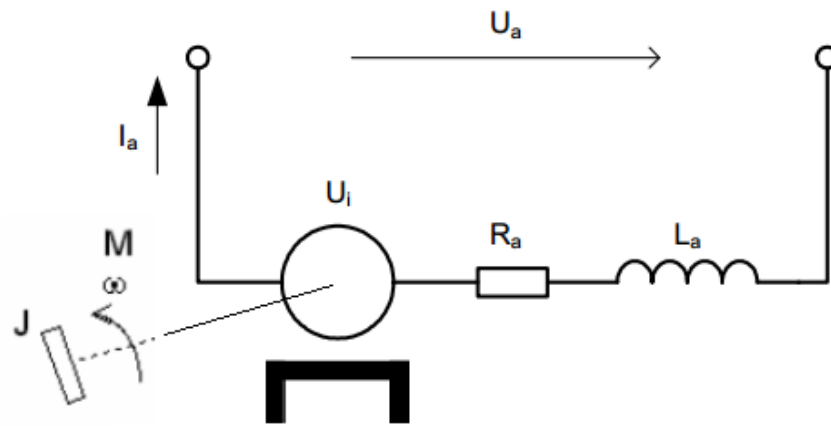

Obr. 9: Momentová charakteristika veternej turbíny [17]

3.2. Matematický model jednosmerného generátora s cudzím buđením (permanentnými magnetmi)

Pre zostavenie matematického modelu budeme vychádzať z rovníc jednosmerného generátora s permanentnými magnetmi (podľa literatúry [13]), kde zahrnieme účinky elektromagnetických dejov a v úvahu budeme brať obvykle zjednodušujúce predpoklady, a to nasledovne:

Konštantné parametre (indukčnosti, odpory, $c\Phi$)

Zanedbanie reakcie kotvy



Obr. 10: Náhradná schéma zapojenia jednosmerného generátora

Rovnice vyjadrené v časovej oblasti

$$u_a = u_i - R_{ac} i_a - L_{ac} (di_a / dt)$$

$$u_i = c\Phi \omega$$

$$M_M = c\Phi i_a$$

$$M_M - M_T = J_c \frac{d\omega}{dt}$$

$$M_T = M_M + J_c \frac{d\omega}{dt}$$

Rovnice vyjadrené po Laplaceovej transformácii

$$U_a(p) = U_i(p) - R_{ac} I_a(p) - L_{ac} p I_a(p) \quad (9)$$

$$U_i(p) = c\Phi \omega(p) \quad (10)$$

$$M_M(p) = c\Phi I_a(p) \quad (11)$$

$$M_M(p) - M_T(p) = J_c p \omega(p) \quad (12)$$

$$M_T(p) = M_M(p) + J_c p \omega(p) \quad (13)$$

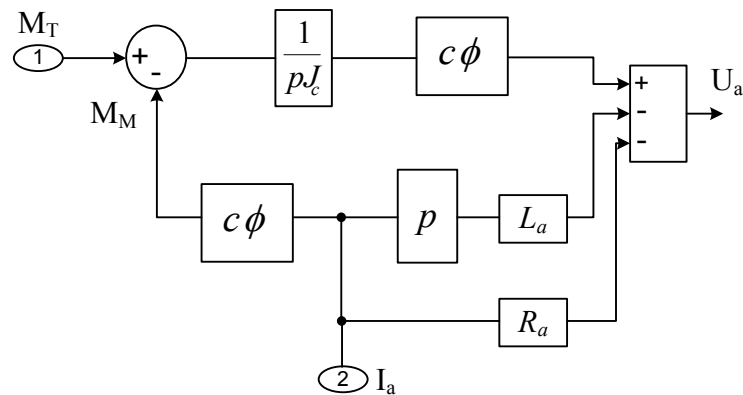
Ďalším krokom bude prechod na operátorove prenosy, (pozri rovnice) :

$$F_{c\Phi}(p) = \frac{U_i(p)}{\omega(p)} = c\Phi \quad (14)$$

$$F_{c\Phi}(p) = \frac{M_M(p)}{I_a(p)} \quad (15)$$

$$F_m(p) = \frac{\omega(p)}{M_M(p) - M_T(p)} = \frac{1}{pJ_c} \quad (16)$$

Výsledkom je bloková schéma

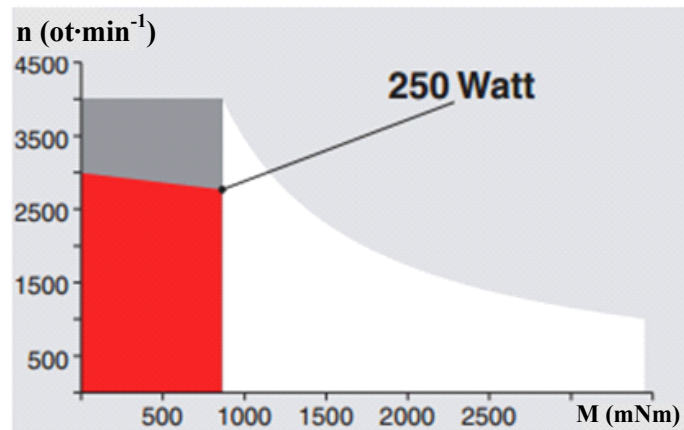


Obr. 11: Štruktúra matematického modelu jednosmerného generátora

Na základe parametrov momentovej charakteristiky veternej turbíny (pozri tabuľku č. 1) bol zvolený typ servomotora maxon DC motor RE 75 (118820) s nasledujúcimi základnými parametrami, ktoré uvádza výrobca.

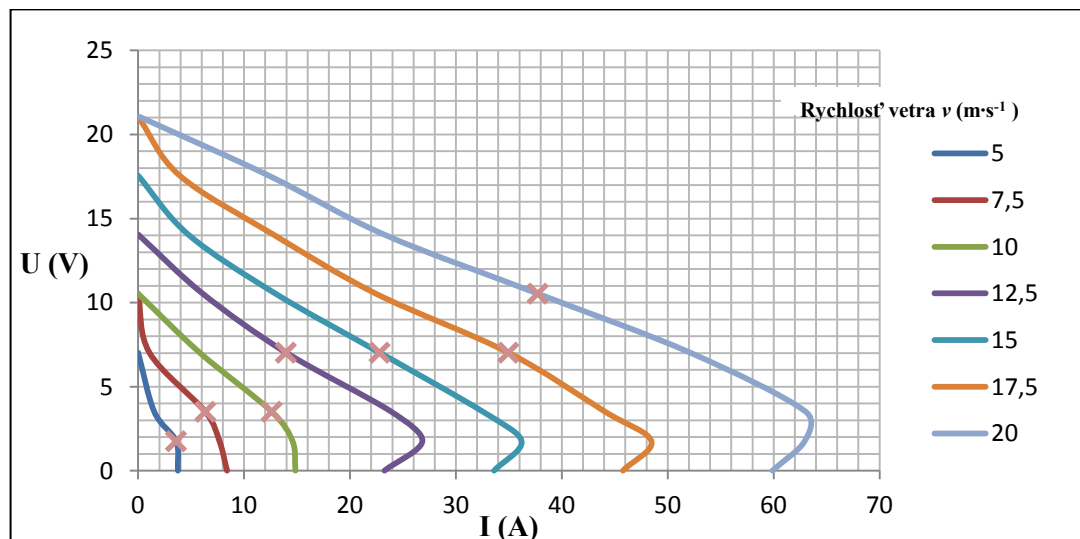
Tab. 2: Katalógové údaje DC motora RE 75 (118820) [14]

Menovitý výkon	250	(W)
Menovité napätie	24	(V)
Otáčky motoru bez zaťaženia	2770	(ot·min ⁻¹)
Moment motoru pri nulových otáčkach	10,9	(Nm)
Konštanta otáčky/moment	0,263	(ot·min ⁻¹ /mNm)
Prúd naprázdno	520	(mA)
Rozbehový prúd	136	(A)
Odpor vinutia kotvy motoru R_a	0,176	(Ω)
Maximálne povolené otáčky	4000	(ot·min ⁻¹)
Maximálny trvalý prúd	9,7	(A)
Maximálny trvalý moment	775	(mNm)
Maximálny výstupný výkon pri menovitom napätí	748	(W)
Momentová konštanta motoru K_m	79,9	(mNm/A)
Otáčková konštanta motoru K_n	119	(ot·min ⁻¹ /V)
Mechanická časová konštanta	4	(ms)
Moment zotrvačnosti motoru	1460	(g·cm ²)
Indukčnosť vinutia motoru L_a	0,08	(mH)



Obr. 12: Momentová charakteristika vybraného DC generátora (motora)[14]

Zo známych hodnôt momentovej charakteristiky veternej turbíny (uvedených v tabuľke č. 1) bola prepočtom pre vybraný generátor získaná vzájomná závislosť napätia a prúdu pri rôznych otáčkach a rôznych veterných režimoch (pozri obrázok č. 13). V týchto charakteristikách generátora sú vyznačené body, charakterizované napätím a prúdom. Podľa ohmového zákona môžeme z týchto údajov napätia a prúdu získať hodnotu optimálneho odporu, ktorou by mal byť zaťažený generátor, aby došlo k maximálnemu využitiu výkonu veternej turbíny. Toto platí pre ideálny stav kde sa neuvažuje so stratami. Ak uvažujeme so stratami v generátore, pri vyšších rýchlostiach vetra sa nedostávame k maximálnemu využitiu výkonu veternej turbíny. [5]



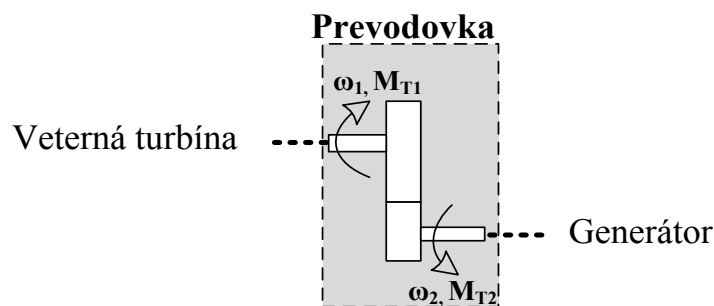
Obr. 13: závislosť napätia a prúdu pri rôznych otáčkach a rôznych veterných režimoch.

Prevodovka

Pretože zvolený DC generátor začína dodávať prúd až od určitých otáčok, je nutné zaradiť prevodovku medzi rotor turbíny a generátor.

Diagram s výkonovými charakteristikami veternej turbíny pri rôznych rýchlostiach vetra v závislosti na otáčkach, môže slúžiť ako podklad pre stanovenie prevodového pomeru medzi rotorom veternej turbíny a generátora. Ten musí byť taký, aby v tomto pomere prepočítaná charakteristika požadovaného výkonu čo najviac súhlasila s maximálnym výkonom veternej turbíny pri rôznych veterných režimoch. Hlavnou úlohou je zaistenie maximálneho výkonu pri nižších rýchlostiach vetra a využitie i horších veterných podmienok s tým, že pri vyšších rýchlostiach vetra nie je výkon naplno využitý [5]. Veľkosť prevodového pomeru je daná,

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{M_{T1}}{M_{T2}} \quad (16)$$



Obr. 14: Prevodovka

Vychádza sa z hodnôt známej momentovej charakteristiky veternej turbíny (tab. 1), kde maximálna hodnota otáčok veternej turbíny pri rýchlosti vetra $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je $n_1 = 180 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Otáčky generátora pri ktorých dosahuje maximum výkonu sú $n_2 = 2770 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.

Jednoduchým odvodením nám vyjde prevodový pomer

$$i = \frac{2770}{180} = 15,38 \quad (17)$$

Na základe tejto úvahy sa dospelo k záveru a výberu prevodovky s najbližším dostupným prevodovým pomerom 14:1 pre zvolený typ DC generátora (motora). Jedná sa o planétovú prevodovku (TYP 110409), ktorá je určená k spojeniu DC generátora (motora). Nasledujúce základné údaje prevodovky sú:

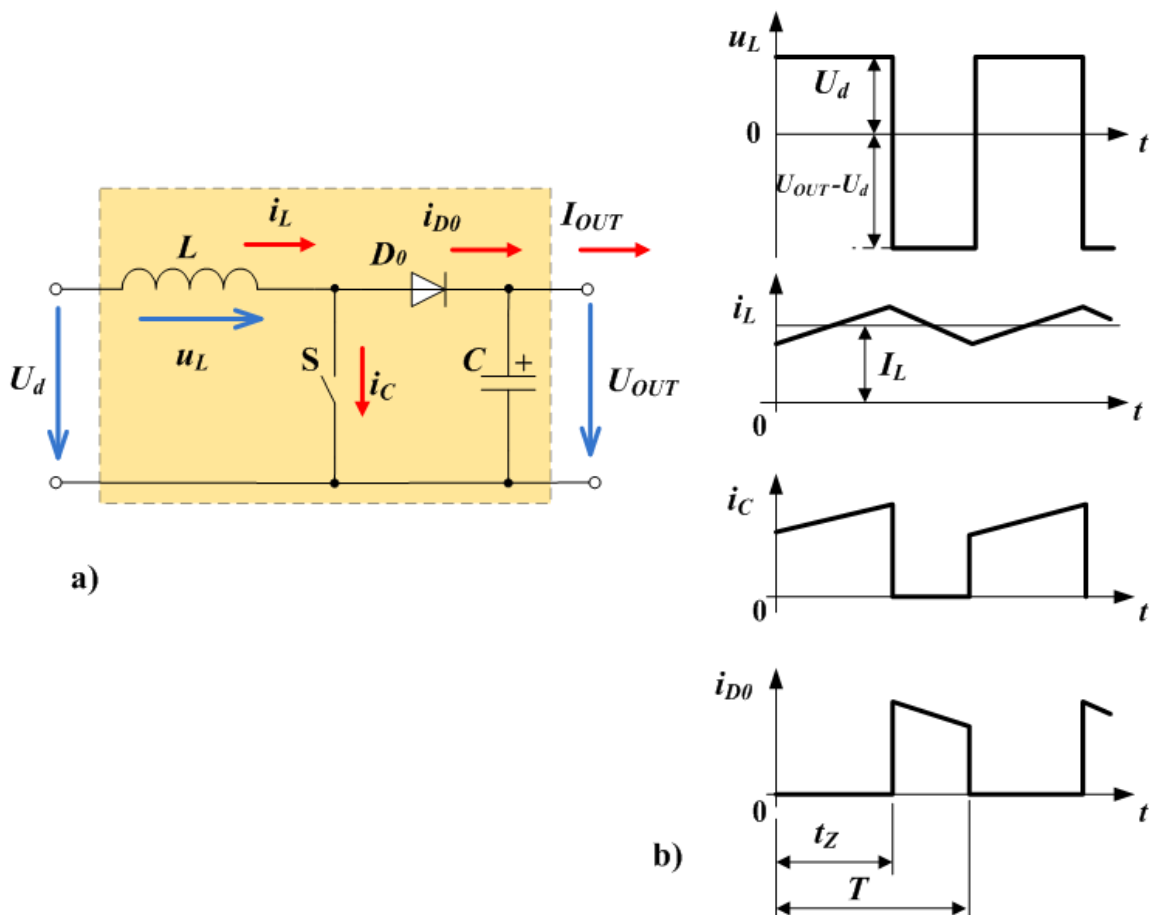
Tab. 3: Katalógové údaje použitej prevodovky [14]

Redukcia	14 : 1	(-)
Celková redukcia	3969/289	(-)
Prevodové stupne	2	(-)
Max. trvalý moment na výstupe prevodovky	60	(Nm)
Krátkodobý prípustný moment	90	(Nm)
Hmotnosť	3000	(g)
Dĺžka prevodovky	105,8	(mm)

3.3. Matematický model jednokvadrantového zvyšujúceho pulzného meniča

Základné zapojenie meniča je zobrazené na obrázku č. 15a. Uvedený popis vychádza z literatúry [15]. Princípom je čerpanie energie zo zdroja U_d v dobe zopnutia spínača S a súčasne akumulovanie v tlmivke L . Pri vypnutí spínača S je energia tlmivky predávaná cez diódu do kondenzátoru C (paralelne do záťaže).

Pre zjednodušenie zavedieme predpoklad $L \rightarrow \infty$, $C \rightarrow \infty$, čo znamená, že vlastná rezonančná frekvencia LC - obvodu leží pod pracovnou frekvenciou spínača.



Obr. 15: Zvyšujúci menič napätia a) Zapojenie meniča b) Priebeh napätia a prúdu.

Z názvu meniča môžeme odvodiť, že menič nie je schopný znižovať výstupné napätie pod hodnotu vstupného napätia U_d . A preto je tento typ meniča vyhovujúci pre tento prípad, kde pri malých rýchlostiach vetra dosahujeme na výstupe generátora malé hodnoty napätia U_d .

Menič je schopný napätie len zvyšovať, a platí nasledujúca podmienka

$$U_{OUT} \geq U_d \quad (18)$$

V prípade nedodržania nerovnosti, bude prúd tlmivkou i_L neobmedzene narastať až do ∞ bez ohľadu na striedu s spínania.

Na obrázku 15b vidíme, že pri zapnutom spínači je

$$u_L(t) = U_d \quad (19)$$

Následne pri vypnutí spínača je

$$u_L(t) = U_d - U_{OUT} \quad (20)$$

V ustálenom stave je stredná hodnota napätia u_L rovná nule, potom môžeme napísať

$$U_{Lstr} = \frac{1}{T} \int_0^T u_L(t) dt = \frac{1}{T} [u_d \cdot t_z - (U_{OUT} - U_d)(T - t_z)] = 0 \quad (21)$$

V prípade, že budeme uvažovať striedu

$$s = \frac{t_z}{T}; s \in \langle 0; 1 \rangle \quad (22)$$

Môžeme rovnicu č. 21 prepísať do nasledujúceho tvaru

$$U_{OUT} = U_d \frac{1}{1-s} \quad (23)$$

Je zrejmé, že v prípade $s \rightarrow 1$ vzrastie výstupné napätie limitne k ∞ . Veľkosťou výstupného napätia budú namáhané oba polovodičové prvky (spínač, dióda).

Výkony na vstupe a výstupe meniča sa musia teoreticky rovnať a preto platí,

$$P_d = P_Z \quad P_d = U_d \cdot I_L \quad P_Z = U_{OUT} \cdot I_{D0str} \quad (24a, b, c)$$

$I_L = I_d$, $I_{D0str} = I_Z$ sú stredné hodnoty prúdu tlmivky a nulovej diódy.

Podľa rovnice (23) musí platiť.

$$I_{D0str} = I_L(1-s) \quad (25)$$

3.3.1. Návrh parametrov jednokvadrantového zvyšujúceho meniča

Pri návrhu parametrov budeme vychádzať z nasledujúcej úvahy. Z tabuľky výkonovej charakteristiky veternej turbíny (tabuľky č. 4) pre rýchlosť vetra $v = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a hodnotu otáčok $n_1 = 15 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ dostávame hodnotu výkonu turbíny $P_T = 6,28 \text{ W}$. Táto hodnota je maximálnou hodnotou pri danej rýchlosti vetra a bez uvažovania so stratami je hodnotou na výstupe generátora. Následne hodnota otáčok hrubiny n_1 je cez prevodový pomer prevodovky i zvýšená na hodnotu otáčok, ktorými sa točí generátor $n_2 = i \cdot n_1 = 14 \cdot 15 = 210 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$

Podľa otáčkovej konštanty $K_n = 119 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}/\text{V}$ (uvedená v tabuľke č. 2 parametrov DC generátora) by pri otáčkach $n_2 = 210 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ malo výstupné napätie generátora U_a dosahovať hodnotu

$$U_a = \frac{n_2}{k} = \frac{210}{119} \doteq 1,765 \text{ V} \quad (26)$$

Maximálny trvalý prúd jednosmerného generátora pri zvolenej rýchlosti vetra je

$$I_a = \frac{P_G}{U_a} = \frac{6,280}{1,765} \doteq 3,558 \text{ A} \quad (27)$$

Návrh meniča

Zvolená hodnota výstupného napätia meniča je stanovená na $U_{OUT} = 14 \text{ V}$, kde za najnižšiu hodnotu vstupného napätia budeme uvažovať práve s hodnotou z výstupu generátora pri rýchlosti vetra $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $U_a = 1,76 \text{ V}$, ktorá je zároveň minimálnou vstupnou hodnotou meniča $U_{d(\min)}$. Spínacia frekvencia f_{sw} bola zvolená na 10 kHz .

Pre modelovanie a návrh meniča budeme ďalej uvažovať niektoré nasledujúce zjednodušujúce predpoklady: Ideálne prvky ako je indukčnosť L , kapacita C , ideálny spínač S .

Podľa ideálneho predpokladu rovnosti výkonov na vstupe a výstupe meniča, a bez uvažovania účinnosti meniča môžeme vyjadriť výstupný prúd meniča $I_Z = I_{OUT}$.

$$P_G = P_m \quad (28)$$

$$I_{OUT} = \frac{P_G}{U_{OUT}} = \frac{6,28}{14} \doteq 0,448 \text{ A} \quad (29)$$

Nasledujúce vzťahy pre výpočet sú prevzaté z literatúry [16]

Striedu spínania môžeme určiť ako

$$s = 1 - \frac{U_{d(\min)}}{U_{OUT}} = 1 - \frac{1,765}{14} \doteq 0,874 \quad (30)$$

Ďalším krokom bude výpočet zvlnenia prúdu tlmivkou ΔI_L , táto hodnota je 20% až 40% hodnoty výstupného prúdu meniča.

$$\Delta I_L = 0,4 \cdot I_{OUT} \cdot \frac{U_{OUT}}{U_{d(\min)}} = 0,2 \cdot 0,448 \cdot \frac{14}{1,765} \doteq 0,710 \text{ A} \quad (31)$$

Výpočet veľkosti indukčnosti tlmivky

$$L = \frac{U_{d(\min)} (U_{OUT} - U_{d(\min)})}{\Delta I_L \cdot f_{sw} \cdot U_{OUT}} = \frac{1,765 \cdot (14 - 1,765)}{0,710 \cdot 10000 \cdot 14} = 217,251 \mu\text{H} \quad (32)$$

Výstupnú hodnotu kapacity určíme ako

$$C_{(\min)} = \frac{I_z \cdot s}{f_{sw} \cdot \Delta U_{OUT}} = \frac{0,448 \cdot 0,874}{10000 \cdot 0,5} = 78,31 \mu\text{F} \quad (33)$$

kde ΔU_{OUT} je zvlnenie výstupného napätia, túto hodnotu som zvolil na 0,5 V.

V simulačnom modeli jednokvadrantového pulzného meniča sa bude ďalej uvažovať s hodnotami $L = 218 \mu\text{H}$, $C = 100 \mu\text{F}$.

Bližší matematicky popis pripojenej záťaže nebolo potrebné uvádzať, pretože záťaž v prvom prípade tvorila čisto odpor a v druhom prípade náhradné zapojenie akumulátora v podobe sériovej kombinácie odporu a jednosmerného napäťového zdroja.

4. Simulačný model veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom

V tejto kapitole je zostavená štruktúra z jednotlivých blokov veternej elektrárne. Pre zostavenie celej štruktúry je potrebné najskôr vytvoriť simulačné modely jednotlivých častí veternej elektrárne. Tieto modely sú zostavené na základe matematického popisu jednotlivých blokov definovaného v predchádzajúcej kapitole. Na základe teoretických predpokladov budú nastavené parametre modelu.

4.1. Simulačný model veternej turbíny

Pre simuláciu správania sa modelu veternej turbíny je možné použiť blok *Wind Turbine* z toolboxu *SimPowerSystems* programu Matlab-Simulink, alebo môžeme na základe predloženej momentovej charakteristiky vytvoriť vlastný model pomocou bloku dvojrozmernej vyhľadávacej tabuľky (*Lookup Table 2-D*).

4.1.1. Popis bloku Wind Turbine

Jedná sa o model založený na ustálených charakteristikách veternej turbíny. Tuhosť hnacieho ústrojenstva je nekonečná a koeficient trenia a zotrvačnosti je spoločný pre turbínu a generátor pripojený k turbíne. Výkon turbíny je definovaný podľa vzťahu číslo 4 uvedeného v kapitole č. 3.1.

Výstupom je mechanický moment daný podľa rovnice č. 38. Aby nedochádzalo k nezrovnalosti a nejednotnosti jednotiek, hodnoty veličín veternej turbíny sú počítané v pomerných jednotkách p.u. (per unit). Jedná sa o bezrozmerné veličiny vzťahujúce sa vždy k zadanej menovitej hodnote. Pre výpočet všetkých veličín veternej turbíny je nutné poznať a zadať všetky potrebné parametre. Tieto hodnoty parametrov sú definované v okne Workspace. [12]

Vyjadrenie výstupného výkonu turbíny v pomerných jednotkách (pu) dostaneme úpravou rovnice č. 4 do nasledujúceho tvaru:

$$P_{T \text{ pu}} = k_p \cdot c_{p \text{ pu}} \cdot v_{\text{wind pu}}^3 \quad (34)$$

$P_{T \text{ pu}}$ výkon v pu k nominálnemu výkonu pre konkrétne hodnoty ρ a S

$c_{p \text{ pu}}$ výkonový koeficient v pu udaný k maximálnej hodnote ($c_{p \text{ max}} = c_{p \text{ nom}} = 0,48$)

$$c_{p \text{ pu}} = \frac{c_p}{c_{p \text{ max}}} \quad (35)$$

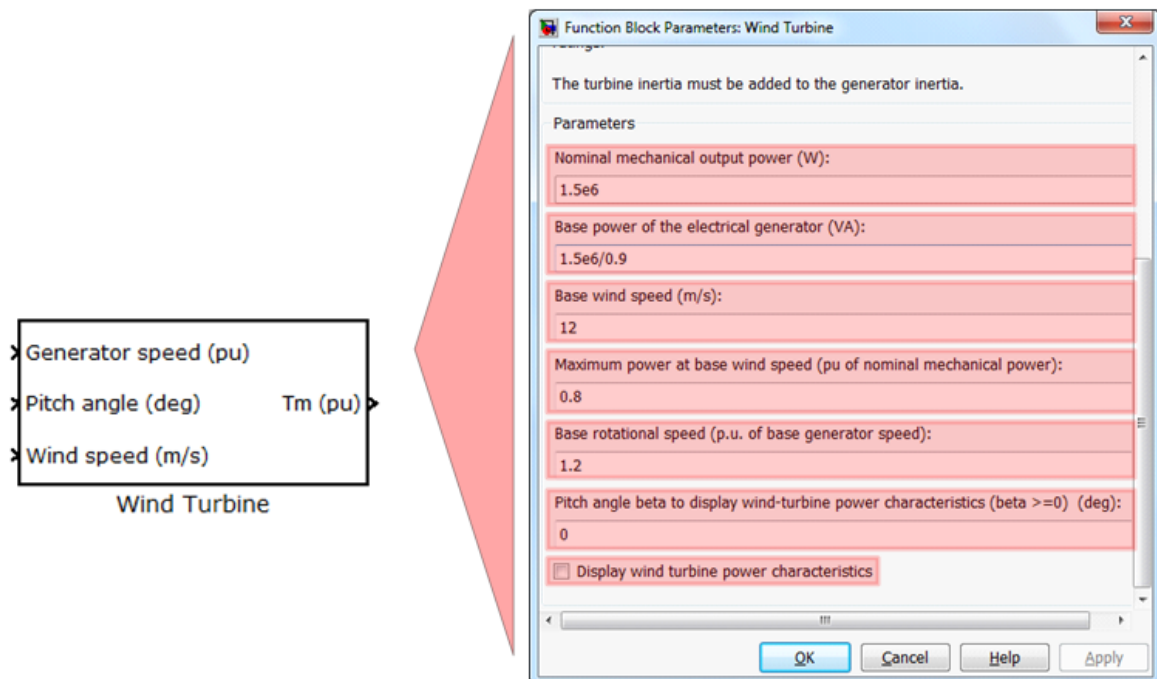
v_{wind_pu} rýchlosť vetra v pu k základnej rýchlosti vetra. Základná rýchlosť vetra je priemerná hodnota očakávanej rýchlosti vetra v ($m \cdot s^{-1}$).

$$v_{wind_pu} = \frac{v}{v_{WIND_BASE}} \quad (36)$$

k_p výkonové zosilnenie, pre $c_{p_pu} = 1$ a $v_{wind_pu} = 1$, platí $k_p \leq 1$, kde $\left(k_p = \frac{\rho S}{2}\right)$

Dialógové okno a parametre bloku veternej turbíny

Pozn. Hodnoty uvedené v dialógovom okne predstavujú východzie hodnoty, ktoré možno meniť podľa požiadavky.



Obr. 16: Blok wind turbine a popis zadávania parametrov [12]

Menovitý mechanický výkon (P_{nom})

Menovitý mechanický výstupný výkon vyjadrený vo wattoch (W) .

Základná hodnota výkonu elektrického generátora ($P_{elec\ base}$)

Menovitý výkon elektrického generátora spojený s veternou turbínou , v jednotkách VA. Táto veličina sa používa pre výpočet menovitého momentu generátora, potrebného k vyjadreniu výstupného momentu turbíny v pu.

Základná rýchlosť vetra ($v_{\text{wind base}}$)

Základnou jednotkou rýchlosti vetra je ms^{-1} , avšak v systéme je použitá pomerná jednotka (pu). Základná rýchlosť vetra je priemerná hodnota očakávanej rýchlosti vetra. Táto rýchlosť vetra produkuje mechanický výkon, ktorý je zvyčajne nižší, než je menovitý výkon turbíny.

Maximálny výkon pri základnej rýchlosti vetra ($P_{\text{wind base}}$)

Maximálny výkon pri základnej rýchlosti vetra v pu v pomere k menovitému mechanickému výkonu. Tento parameter je definovaný ako *výkonový zisk kp*.

Základné otáčky ($\omega_{\text{speed nom}}$)

Hodnota otáčok pri maximálnom výkone a pri základnej rýchlosti vetra, vyjadrená v pu.

Uhol natočenia listov vrtule β pre zobrazenie výkonových charakteristík veternej turbíny

Uhol natočenia listov vrtule β sa udáva v stupňoch, slúži na zobrazenie výkonovej charakteristiky veternej turbíny. Uhol β musí byť väčší alebo rovný nule.

Zobrazenie výkonových charakteristík veternej turbíny

Ak je začiarknuté tento parameter, výkonové charakteristiky turbíny sú zobrazené pre rôzne rýchlosti vetra a pre zadaný uhol natočenia vrtuľových listov beta. [12]

Vstupy a výstupy bloku wind turbine

Otáčky generátora ω_{pu} (pu)

$$\omega_{pu} = \frac{\omega_m}{\omega_n} \quad (37)$$

Vstupné otáčky generátora vyjadrené v pu. ω_m je skutočná uhlová rýchlosť rotoru generátora a

$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}$ je menovitá uhlová rýchlosť generátora. U synchronného alebo asynchronného

generátora sú menovité otáčky n_n synchronné otáčky. Pre generátor s permanentnými magnetmi sú menovité otáčky n_n definované ako otáčky naprázdno.

Uhol natočenia vrtuľových listov β (°)

Vstup pre uhol natočenia listov vrtule, kde však platí podmienka, že uhol β musí byť väčší alebo rovný nule.

Rýchlosť vetra v (m/s)

Vstup rýchlosti vetra v udávaný v (ms^{-1})

 M_m (pu)

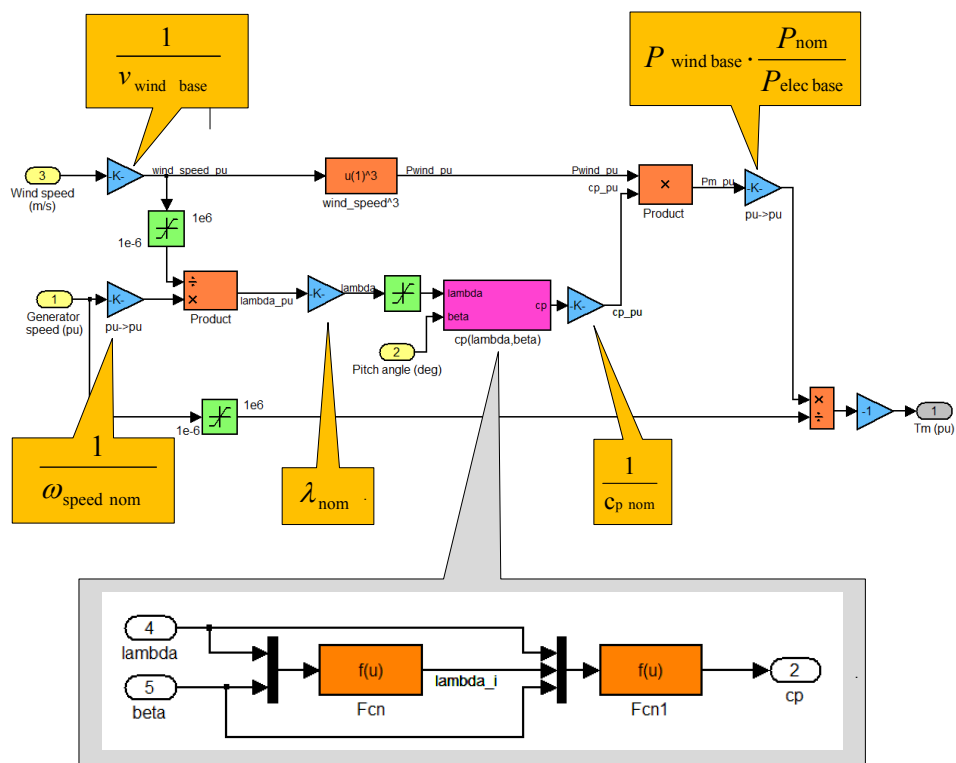
$$M_{m\ pu} = \frac{P_{m\ pu}}{\omega_{pu}} \quad (38)$$

Výstup mechanického krútiaceho momentu veternej turbíny $M_{m\ pu}$ v pu, ktorý je vyjadrený pomocou menovitého výkonu $P_{m\ pu}$ a menovitých otáčok generátora ω_{pu} , kde pre obe veličiny platí vyjadrenie v pu. [12]

Realizácia štruktúry bloku Wind Turbine

K zostaveniu štruktúry bloku veternej turbíny (pozri obrázok č. 17) je potrebné poznať rýchlobežnosť λ (označovaná tiež ako rýchlostný pomer). Výpočet je pomocou nasledujúcej rovnice:

$$\lambda = \lambda_{nom} \frac{\omega_{pu} \frac{1}{\omega_{speed\ nom}}}{v_{wind\ pu}} \quad (39)$$



Obr. 17: Simulačná štruktúra bloku *wind turbine* [12]

Popis štruktúry

Nasledujúci popis sa týka vyššie zobrazenej štruktúry (pozri obrázok č. 17). Rýchlosť vetra privádzaná na vstup 3 je pomocou základnej rýchlosti vetra (v_{wind_base}) prevedená na pu podľa vzťahu č. 36. Takto vyjadrená rýchlosť je ďalej prevedená na 3 mocninu pomocou bloku umocňovacej funkcie. Otáčky generátora vyjadrené v pu sú za pomoci preddefinovanej hodnoty otáčok $\omega_{speed\ nom}$ prevedené na hodnotu potrebnú pre získanie rýchlostného pomeru λ (pozri vzťah č. 39). Získaná hodnota rýchlostného pomeru λ spolu s uhlom natočenia lopatiek vrtule β vstupuje do bloku vyhodnotenia výkonového činiteľa c_p .

Blok vyhodnotenia c_p pozostáva z podsystemu, ktorého základ tvoria dva funkčné bloky. Prvý funkčný blok (Fcn) obsahuje zápis rovnice pre výpočet λ_i (pozri vzťah č. 7) a v nasledujúcom bloku funkcie (Fcn1) je zadefinovaná rovnica pre samotný výpočet výslednej hodnoty výkonového súčiniteľa c_p (pozri rovnicu č. 5).

Po získaní hodnoty výkonového činiteľa c_p , je urobený prevod na pu, a to za pomoci menovitej hodnoty výkonového činiteľa c_{p_nom} podľa rovnice č. 35.

Nasleduje výpočet výstupného výkonu v pu, ten je vyjadrený zo základného vzťahu $P_{m\ pu}$ (rovnica 34) násobený konštantou, podľa nasledujúcej rovnice:

$$P_{m\ pu} = P_{m\ pu} \cdot \text{konšt} = (c_{p\ pu} \cdot v_{wind\ pu}^3 \cdot P_{wind\ base}) \cdot \left(\frac{P_{nom}}{P_{elec\ base}} \right) \quad (40)$$

Poslednú časť tvorí vyhodnotenie výstupného mechanického momentu v pomerných jednotkách podľa vzťahu č. 40.

Okno Workspace

V okne Workspace (pozri obrázok č. 18) sú všetky nadefinované premenné potrebné v priebehu práce v simulinku (práca s blokom *wind turbine*). Okno obsahuje úplný zoznam všetkých potrebných premenných a parametrov, ktoré je možné upravovať, načítať, uložiť, previesť ich na grafické zobrazenie a pod. Zelené vyznačené poznámky priradené k jednotlivým premenným poukazujú na parametre, ktoré definuje užívateľ v dialógové okne bloku veternej turbíny. Oranžovou farbou sú vyznačené poznámky, ktoré zadefinoval užívateľ ako vnútorné premenné.

Name	Value	Min	Max
DisplayTurbChar	'off'		
P_wind_base	0.8000	0.8000	0.8000
ParVisible	<1x10 cell>		
Pwind_pu	<8x150 double>	-0.2327	1.2614
ans	<1x1 com.mathwork...>		
c1	0.5176	0.5176	0.5176
c1_c6	[0.5176,116,0.4000,5,2,...]	0.0068	116
c2	116	116	116
c3	0.4000	0.4000	0.4000
c4	5	5	5
c5	21	21	21
c6	0.0068	0.0068	0.0068
cp	0.4557	0.4557	0.4557
cp_nom	0.4800	0.4800	0.4800
cp_pu	0.9493	0.9493	0.9493
fig_num	2	2	2
i	7	7	7
k	7	7	7
lambda	9.1493	9.1493	9.1493
lambda_i	13.4594	13.4594	13.4594
lambda_nom	8.1000	8.1000	8.1000
lambda_pu	1.1295	1.1295	1.1295
p_max	[0.1000,0.1728,0.2744,...]	0.1000	1.2614
pitch_angle	0	0	0
speed	[0.6010,0.7210,0.8410,...]	0.6010	1.4410
speed_nom	1.2000	1.2000	1.2000
tout	<51x1 double>	0	10
wind1	[6,7.2000,8.4000,9.6000,...]	6	12
wind2	13.2000	13.2000	13.2000
wind_base	12	12	12
wind_max	14	14	14
wind_min	6	6	6
wind_pu	[0.5000,0.6000,0.7000,...]	0.5000	1.1000
wr_elec_pu	<1x150 double>	1.0000...	1.4910
wr_mec_pu	<1x150 double>	8.3333...	1.2425

Výkonový zisk k_p

Koeficienty $c1$ až $c6$, potrebné pre výpočet, výkonového činiteľa c_p

Menovitá hodnota c_{pnom} , tiež definovaná ako maximálna hodnota $c_{pmax} = 0,48$

Vypočítaná hodnota c_p prevedená na pomerne jednotky pu.

Vypočítaná hodnota λ .

Hodnota λ_{nom}

Uhol natočenia vrtuľových listov β

Hodnota otáčok $\omega_{speed nom}$

Základná rýchlosť vetra v_{wind_base}

Obr. 18: Popis okna Workspace simulačného bloku wind turbine [12]

Analýzou bloku *wind turbine* sme dospeli k záveru, že použitie tohto bloku nie je vhodné pre aplikáciu štruktúry malej veternej turbíny s DC generátorom. Blok *wind turbine* je vhodný pre vyššie výkonové oblasti. Používa sa v štruktúrach pre veľké výkony v jednotkách MW. Ďalej potrebuje pre svoju správnu funkciu parametre a koeficienty, ktoré závisia na type použitej veternej turbíny, jej konštrukčných vlastnostiach, geometrických rozmeroch a počte rotorových listov pod. Niektoré z týchto údajov výrobcu malých veterných turbín neuvádza vo svojej technickej dokumentácii, a preto výhodné bude ďalej riešiť štruktúru s použitím vlastného modelu veternej turbíny.

4.2. Zostavenie modelu pomocou dvojrozsmernej vyhľadávacej tabuľky

Teraz môžeme prísť k zostaveniu samotného modelu, ktorého základ tvorí blok dvojrozsmernej vyhľadávacej tabuľky (angl. *Lookup Table 2-D*), do ktorej môže byť zadefinovaná závislosť výkonovej charakteristiky (tabuľka č. 4) alebo závislosť momentovej charakteristiky veternej

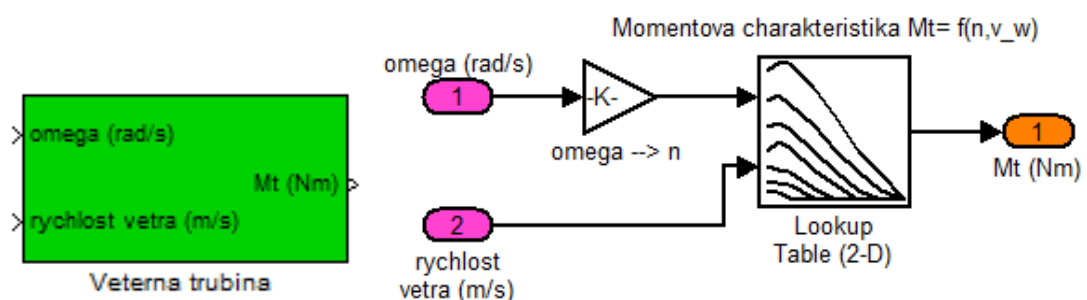
turbíny – $M_T = f(n, v)$ (tabuľka č. 1). Zvolené bolo zadefinovanie momentovej charakteristiky a to v podobe jednotlivých bodov uvedených v tabuľke č. 1, s tým rozdielom, že konkrétne hodnoty záporného momentu nie sú známe, preto tieto hodnoty nebudú brané v úvahu, a budú nahradené za nulové hodnoty. Motorický stav nebude zohľadnený v modeli. Tento model je založený na ustálených charakteristikách veternej turbíny. Tuhosť hnacieho ústrojenstva je nekonečná a koeficient trenia a zotrvačnosti je spoločný pre turbínu a generátor pripojený k turbíne. Tzn. že celkový moment zotrvačnosti je daný momentom zotrvačnosti pripojeného generátora. Vstupy do bloku budú hodnoty rýchlosti vetra a veľkosť otáčok generátora. Výstupom modelu dostávame moment turbíny M_T .

Blok vyhľadávacej tabuľky sa nachádza v knižnici *Lookup Tables* programu Matlab - Simulink kde máme k dispozícii blok dvojrozsmernej vyhľadávacej tabuľky (angl. *Lookup Tables 2-D*). Blok využíva vstupné hodnoty pre generovanie výstupu a to pomocou zvolenej metódy. V tomto prípade je použitá metóda lineárnej interpolácie a extrapolácie vstupov. Pomocou tejto metódy výstupu sa priradujú hodnoty nasledovne:

Ak vstupné hodnoty zodpovedajú známym parametrom stĺpcov a riadkov, na výstup je priradená hodnota v priesečníku príslušného riadka a stĺpca.

Ak vstupné hodnoty nezodpovedajú známym parametrom stĺpcov a riadkov, blok vykonáva lineárnu interpoláciu medzi príslušnými hodnotami riadkov a stĺpcov. Ak sú hodnoty jedného alebo oboch vstupov menšie ako prvý alebo väčšie ako posledný riadok resp. stĺpec, blok využije extrapoláciu na nájdenie približnej hodnoty funkcie pomocou prvých dvoch alebo posledných dvoch bodov. [19]

Túto zvolenú metódu možno použiť len pre rovnaký dátový typ vstupných a výstupných údajov.

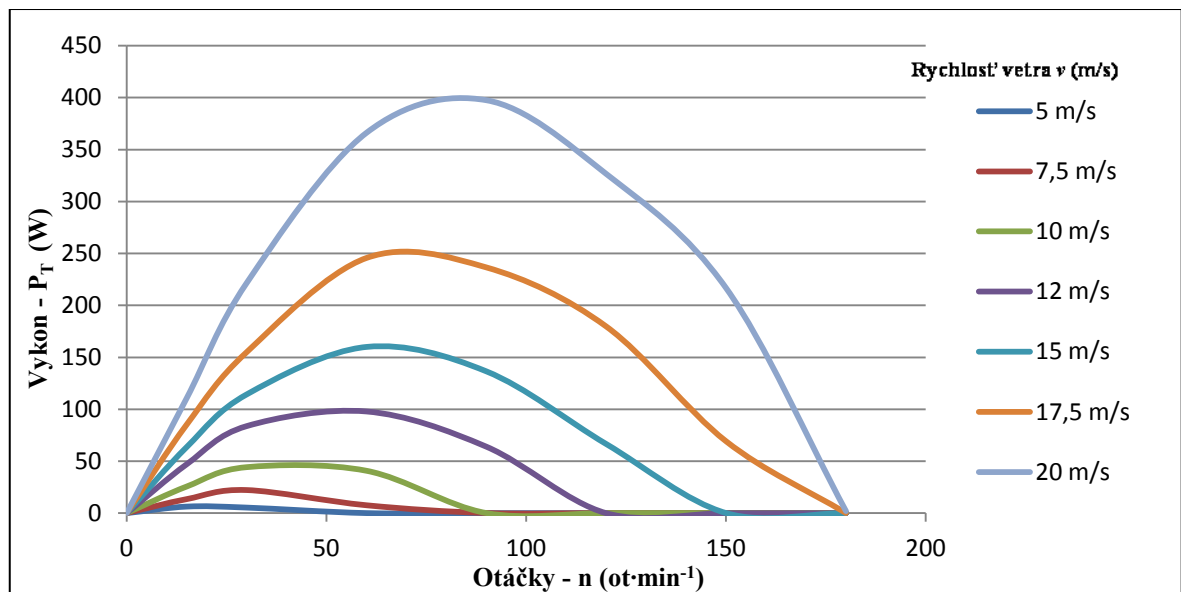


Obr. 19: Simulačný model veternej turbíny

Prepočtom závislosti momentových charakteristík boli získané závislosti výkonových charakteristík veternej turbíny. Uvedená tabuľka 4 ukazuje ako sa v závislosti na otáčkach rotoru mení veľkosť výkonu veternej turbíny – P_T pri danom režime vetra.

Tab. 4: Závislosť výkonu P_T na otáčkach rotoru n

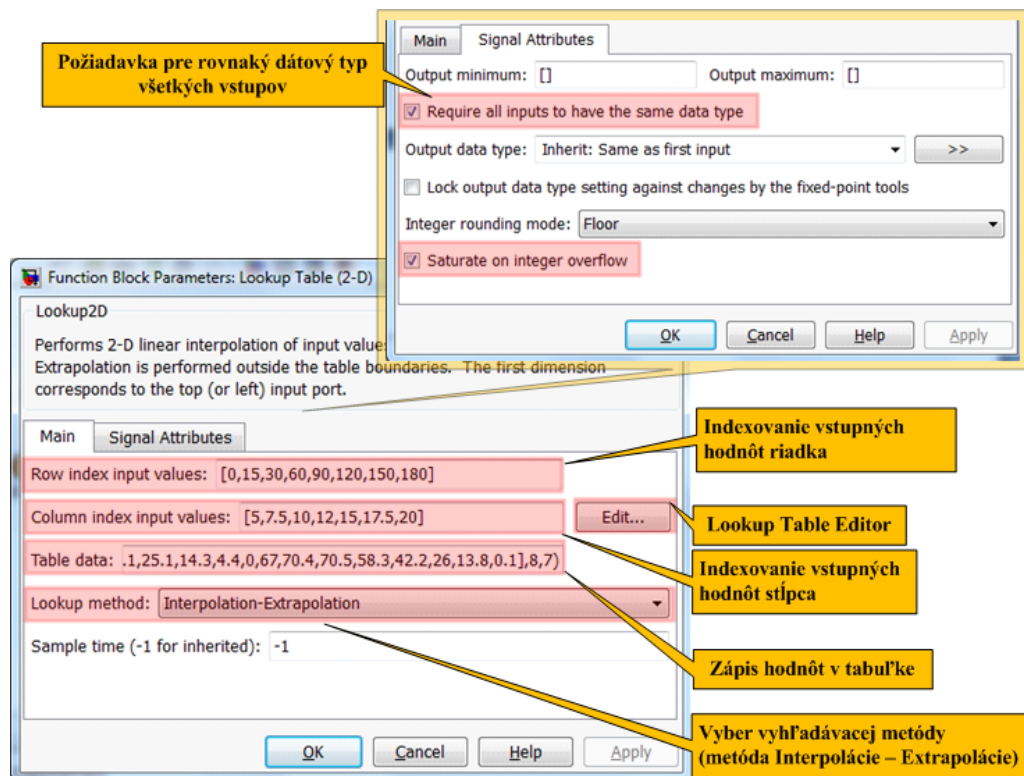
n/v	5	7,5	10	12	15	17,5	20
0	0	0	0	0	0	0	0
15	6,28	13,502	25,591	47,1	63,585	85,094	110,528
30	5,338	22,294	44,274	83,838	114,296	154,802	221,37
60	0	7,536	40,82	97,968	160,14	245,548	366,124
90	0	0	0	64,056	136,59	236,442	397,524
120	0	0	0	0	66,568	179,608	326,56
150	0	0	0	0	0	69,08	216,66
180	0	0	0	0	0	0	1,884



Obr. 20: Výkonová charakteristika veternej turbíny

Dialógové okno pre zadanie parametrov bloku Lookup Table (2-D)

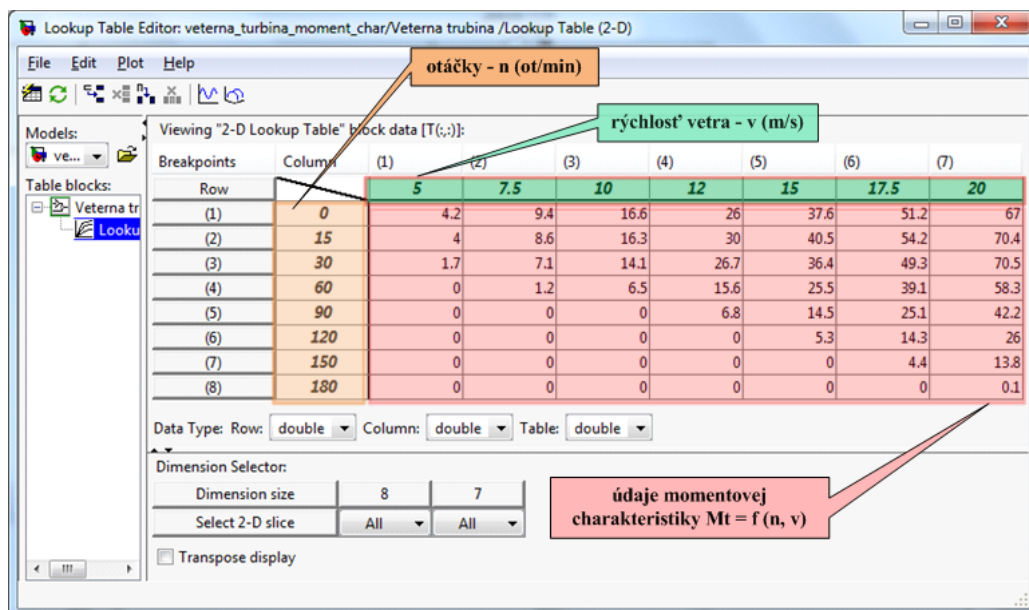
Na nasledujúcom obrázku č. 21 je zobrazené nastavenie dialógového okna pre zadávanie parametrov bloku dvojrozmernej vyhľadávacej tabuľky (angl. *Lookup Table(2-D)*). Všetky nastavenia a parametre sú zrejme z uvedeného popisu.



Obr. 21: Dialógové okno pre zadanie parametrov bloku Lookup Table (2-D)

Dialógové okno vyhľadávacej tabuľky

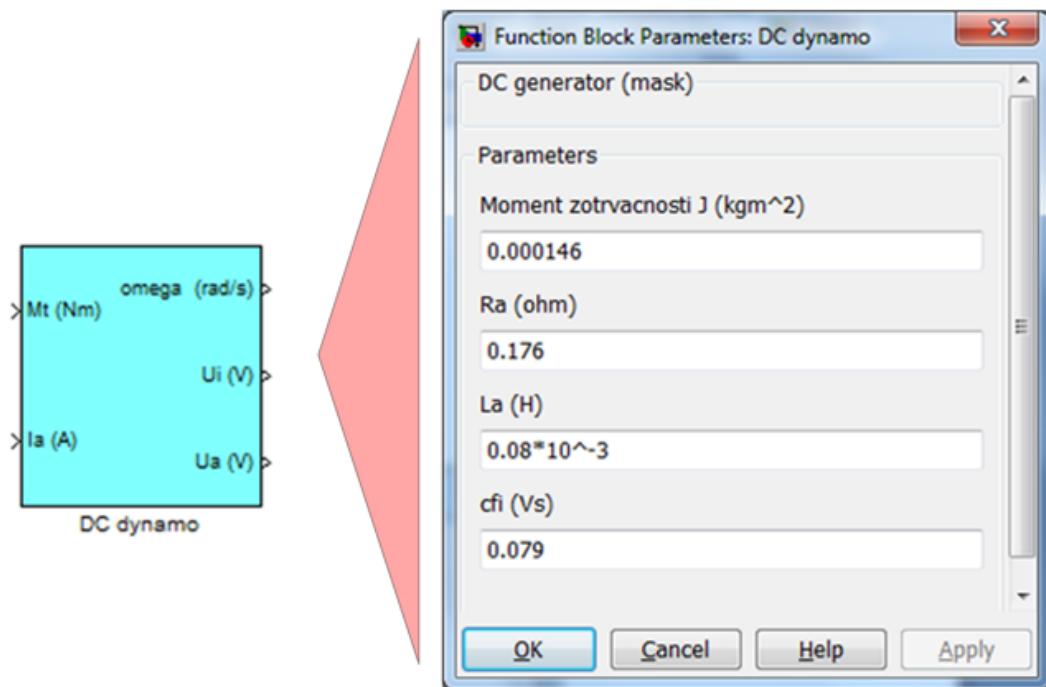
Do tohto okna sú prepísané hodnoty momentovej charakteristiky veternej turbíny z tabuľky č. 1 v podobe riadkov a stĺpcov. Na obrázku č. 22 je zrejme zadanie jednotlivých hodnôt.



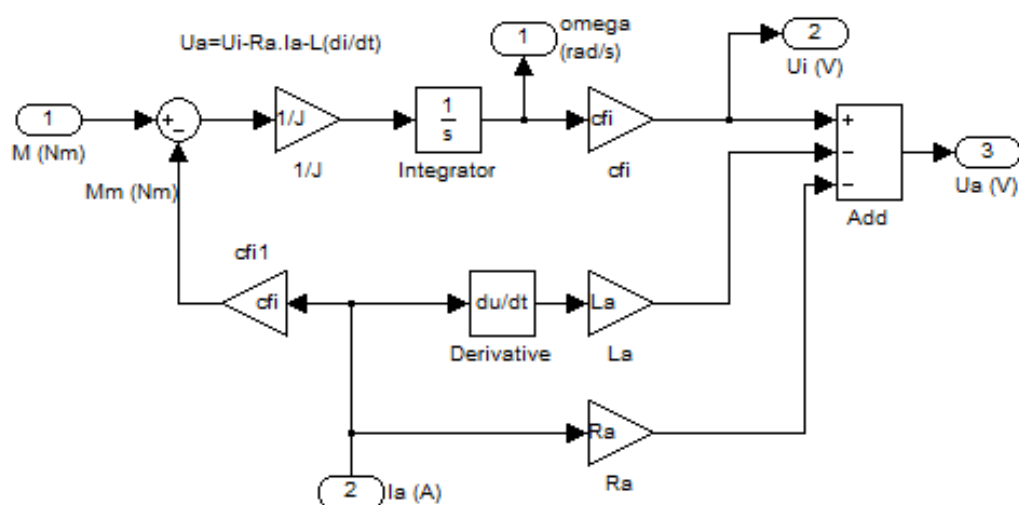
Obr. 22: Dialógové okno vyhľadávacej tabuľky

4.3. Simulačný model jednosmerného generátora s permanentnými magnetmi

Pri zostavení simulačného modelu jednosmerného generátora (pozri obrázok č. 24) vychádzame z matematického popisu jednosmerného generátora s permanentnými magnetmi uvedeného v podkapitole 3.2. Parametre pre tento model jednosmerného generátora sú zadane podľa tabuľky č. 2. Nastavenie parametrov pre jednosmerný generátor je zobrazené na nasledujúcom obrázku č. 23.



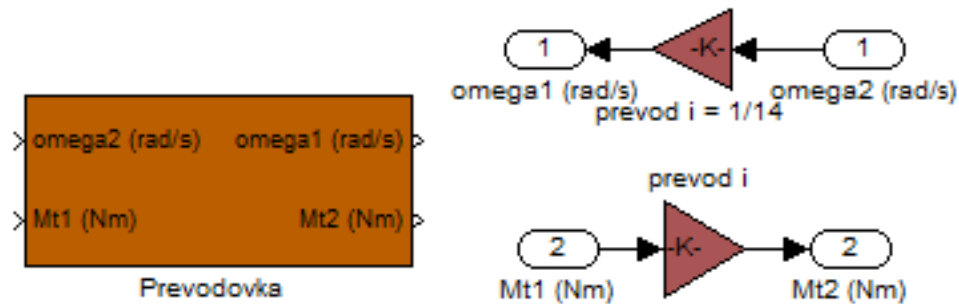
Obr. 23: Zadavanie parametrov DC generátora do simulačného modelu



Obr. 24: Simulačná štruktúra jednosmerného generátora

4.4. Simulačný model prevodovky

Model prevodovky je realizovaný jednoducho za pomoci blokov konštánt, v ktorých je zadefinovaná hodnota prevodu. Model je založený na predpoklade nekonečnej tuhosti hriadele a na nulových stratách, neuvažuje sa s momentom zotrvačnosti veternej turbíny.



Obr. 25: Štruktúra simulačného modelu prevodovky

4.5. Simulačný model jednokvadrantového pulzného meniča

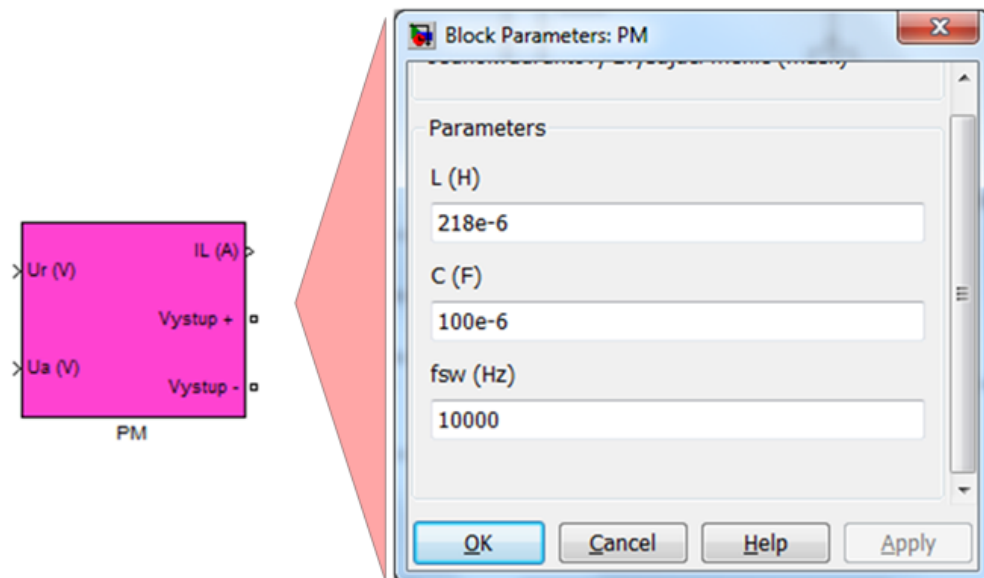
Nasledujúca štruktúra simulačného modelu jednokvadrantového pulzného meniča (pozri obrázok č. 27) je vytvorená na základe základného zapojenia zvyšujúceho pulzného meniča uvedeného v podkapitole 3.3. Model meniča pozostáva z prvkov, ktoré sa nachádzajú v knižnici *simpowersystems* programu Matlab - Simulink. Použité sú modely prvkov ideálnej indukčnosti (L), kapacity (C) a ideálny spínač (angl. *Ideal Switch*). Model prvku diódy nie je ideálny, ale obsahuje preddefinované parametre reálnej diódy.

Ďalej bolo potrebné na prepojenie bloku jednosmerného generátora s pulzným meničom použiť rozhranie, ktoré zabezpečí prevedenie vstupného resp. výstupného signálu napätia U_a z bloku jednosmerného generátora na zodpovedajúce výstupné napätie generované práve týmto vstupným signálom. Na tento účel nám poslužil prvok bloku riadený napäťový zdroj (angl. *Controlled Voltage Source*). Ďalší blok (angl. *Current Measurement*) slúži na meranie okamžitého prúdu v meniči. Výstup z tohto bloku poskytuje signál, v podobe prúdu I_L , ktorý privádzame do bloku jednosmerného dynama na vstup I_a . Oba tieto bloky sa nachádzajú v knižnici *Electrical Sources* programu Matlab - Simulink.

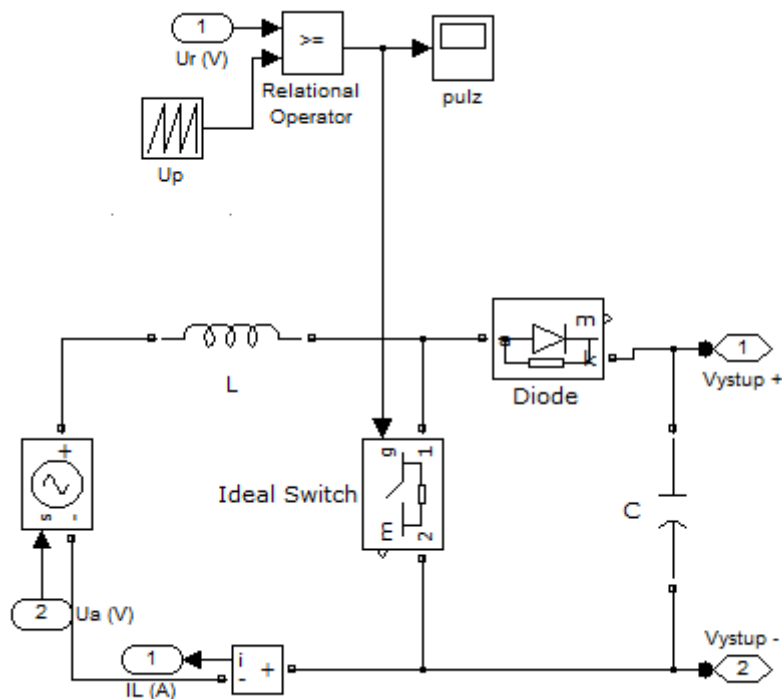
Ovládanie spínania ideálneho spínača je zabezpečené jednoduchým vyhodnotením stavu 0 alebo 1 za pomoci bloku *Relation Operator*, porovnávaním napätia pili U_p s napätím riadiacim U_r . U_p je definované v bloku opakovacej sekvencie s opakovacou periódou f_{sw} (hodnota f_{sw} zvolená na 10 kHz), a amplitúda signálu je nastavená na 10 V. Hodnota U_r je privádzaná na vstup ako konštanta, môže sa meniť od 0 do 10 V. Hodnota U_r môže byť tiež privádzaná z regulátora. Menič tiež pracuje ako menič impedancie, to znamená že optimálnym riadením by sme mohli dospieť k optimálnemu

využitíu produkovaného výkonu. Menič nám prispôsobuje záťaž generátora tak, aby sa vrtuľa otáčala optimálnou rýchlosťou. Riešenie a realizácia regulátora nie je predmetom práce.

Zadanie parametrov pre jednokvadrantový zvyšujúci pulzný menič vychádza z vypočítaných parametrov uvedených v podkapitole 3.3.



Obr. 26: Zadávanie parametrov do simulačného modelu pulzného meniča



Obr. 27: Štruktúra pulzného meniča

4.6. Simulačná štruktúra veternej turbíny s DC generátorom a pulzným meničom

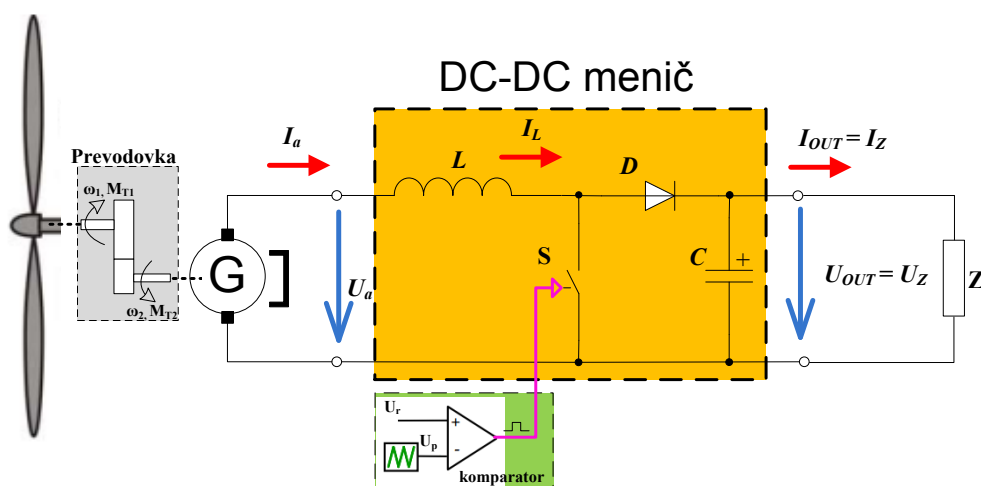
Spojením vyššie popísaných blokov dostávame simulačnú štruktúru veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom (pozri príloha A). Na výstup meniča je pripojený náhradný model batérie pozostávajúcej z vnútorného odporu R_o v sériovom zapojení s jednosmerným napäťovým zdrojom 12 V a paralelne k tomu radená záťaž, ktorú reprezentuje odpor R . Dimenzovanie a konfigurácia presných parametrov reálneho zapojenia, ako aj riešenie ďalších potrebných pomocných obvodov (napr. na ochranu akumulátora a pod.) nie je predmetom riešenia tejto práce. Jedná sa len o simulačné overenie spojenia jednotlivých komponentov ako celku výslednej štruktúry (pozri príloha A) a overenie spolupráce a funkčnosti v ustálenom stave. Reguláciou by bolo možné presne regulovať dobíjací prúd resp. regulovať dobíjanie alebo reguláciou meniča upravovať zaťaženie generátora tak, aby došlo k maximálnemu využitiu výkonu veternej turbíny. Týmto boli popísané ďalšie možnosti využitia simulácie. Návrh regulátoru však nie je predmetom riešenia. V tomto simulačnom modeli nastavujeme hodnotu riadiaceho napätia U_r , ktorou upravujeme striedu spínania spínača pulzného meniča. Táto hodnota je konštantou a zadáva sa pred začiatkom spustenia simulácie. Bližší popis vyhodnotenia spínania je uvedený v podkapitole 4.5.

5. Simulačné overenie veternej elektrárne s DC generátorom a pulzným meničom

V tejto kapitole sa zameriame na overenie správnej funkčnosti celej simulačnej štruktúry (pozri príloha A). Jedná sa o simulačné overenie spojenia jednotlivých komponentov ako celku, overenie spolupráce a funkčnosti sa bude prebiehať v ustálenom stave. Zobrazenie niektorých veličín a tiež dôležitých hodnôt, následná analýza strát, ktoré vznikajú v jednotlivých častiach simulačnej štruktúry.

5.1. Simulačné overenie pre štruktúru veternej turbíny s meničom a R záťažou

Nasledujúci obrázok zobrazuje štruktúru veternej turbíny s meničom a odporovou záťažou. Ide o najjednoduchšiu konfiguráciu, kde záťaž môže predstavovať spotrebič. Zapojenie je prvou variantou štruktúry popisovanej v tretej kapitole. Na obrázku č. 28 vidíme vyznačené jednotlivé veličiny, ktorých hodnoty v ustálenom stave pre zvolenú rýchlosť vetra, striedu a veľkosť záťaže, sú uvedené v nasledujúcej tabuľke č. 5. Táto jednoduchá konfigurácia slúži k overeniu správnej funkcie s vyhodnotením strát, ktoré vznikajú v jednotlivých častiach modelu. Následne boli zobrazené priebehy niektorých veličín.



Obr. 28: Štruktúra veternej elektrárne s DC generátorom, pulzným meničom a R záťažou

Pre výkony jednotlivých častí modelu platí

$$\text{Mechanický výkon turbíny : } P_T = \omega_1 \cdot M_{T1} \quad (41)$$

$$\text{Výstupný elektrický výkon generátora (dynama): } P_G = U_a \cdot I_a \quad (42)$$

Výkon na výstupe meniča sa rovná výkonu záťaže : $P_m = P_Z = U_Z \cdot I_Z$ (43)

kde $I_L = I_a, I_Z$ sú stredné hodnoty prúdu tlmivky a záťaže

Tab. 5: Hodnoty veličín v ustálenom stave pri rôznych rýchlostiach vetra, triedy, a záťaže

	záťaž R = 5 Ω			záťaž R = 10 Ω			záťaž R = 20 Ω		
strieda	80%	50%	20%	80%	50%	20%	80%	50%	20%
v (m/s)	5	10	20	5	10	20	5	10	20
ω_1 (rad/s)	1,320	6,688	17,420	1,768	7,726	18,100	2,285	8,299	18,460
M_{T1} (Nm)	4,032	5,655	6,275	3,710	3,506	3,342	2,953	2,320	1,775
P_{T1} (W)	6,322	37,821	109,316	6,559	27,093	60,487	6,747	19,254	32,765
ω_2 (rad/s)	18,480	93,640	243,900	24,750	108,200	253,400	31,990	116,200	258,400
M_{T2} (Nm)	0,342	0,404	0,448	0,265	0,250	0,239	0,211	0,166	0,127
P_{T2} (W)	6,322	37,821	109,316	6,559	27,093	60,487	6,747	19,254	32,765
Straty v prevodovke ($\Delta P_{JP} = P_{T1} - P_{T2}$)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_L = I_a$ (A)	3,656	5,079	5,654	3,355	3,170	3,039	2,655	1,785	1,573
U_a (V)	0,816	6,502	18,280	1,364	7,987	19,480	2,059	8,864	20,140
P_G (W)	2,984	33,030	103,300	4,577	25,318	59,220	5,468	15,820	31,660
Straty v generátore ($\Delta P_{JG} = P_{T1} - P_G$)	3,338	4,791	6,016	1,982	1,775	1,267	1,279	3,434	1,105
I_{OUT} (A)	0,694	2,485	4,461	0,635	1,546	2,385	0,501	0,863	1,233
U_{OUT} (V)	3,468	12,430	22,310	6,354	15,460	23,850	10,020	17,250	24,670
$P_m = P_Z$ (W)	2,406	30,880	99,510	4,038	23,910	56,860	5,016	14,880	30,420
Straty v meniči ($\Delta P_{JM} = P_G - P_m$)	0,578	2,150	3,790	0,539	1,408	2,360	0,452	0,940	1,240

Pri vyhodnotení hodnôt jednotlivých výkonov pomocou simulačného modelu a ich porovnaním sme zistili, že tieto výkony sa v jednotlivých častiach modelu líšia o straty. Straty vznikajú v generátore (dynamy) a tiež v meniči. Straty v prevodovke nevznikajú. Následne si analyzujeme tieto straty.

Straty v bloku modelu generátora

Pre ideálny stav by malo platiť

$$P_T = P_G \quad (44)$$

Podľa výsledkov však tento rovnovážny stav neplatí, a mechanický výkon sa od elektrického výkonu na výstupe generátora líši o straty vznikajúce v generátore (dynamy). Blok modelu

jednosmerného generátora zahŕňa iba joulove straty, všetky ostatné straty nie sú brané v úvahu. Joulove straty vznikajú na odpore vinutia generátora R_a prechodom prúdu I_a .

Tieto straty vo vinutí kotvy môžeme vyjadriť nasledovne.

Mechanický výkon jednosmerného generátora

$$P_T = M_{T1} \cdot \omega_1 = P_{G_{mech}} = M_{T2} \cdot \omega_2 = c\phi \cdot I_a \cdot \frac{U_i}{c\phi} = U_i \cdot I_a \quad (45)$$

Výkon generátora, ktorý zahŕňa joulove straty

$$P_G = U_a \cdot I_a + \Delta P_{JG} = (U_i + R_a I_a) I_a + \Delta P_{JG} \quad (46)$$

Následne porovnaním týchto dvoch rovníc získame joulove straty vo vinutí kotvy ΔP_{JG}

$$P_T = P_G \quad (47)$$

$$U_i \cdot I_a = (U_i + R_a I_a) I_a + \Delta P_{JG} \quad (48)$$

$$\Delta P_{JG} = R_a I_a^2 \quad (49)$$

Ako príklad overenia správnosti vyjadrenia a analýzy strát môžeme vychádzať z hodnôt uvedených v tabuľke č. 5 (štvrtý stĺpec hodnôt) :

$$\Delta P_{JG} = P_T - P_G = 6,559 - 4,577 = 1,982 \text{ W} \quad (50)$$

$$\Delta P_{JG} = R_a I_a^2 = 0,176 \cdot 3,355^2 = 1,982 \text{ W} \quad (51)$$

Podľa výsledku môžeme dospieť k záveru, že straty, ktoré vznikli v generátore sú skutočne joulove straty vzniknuté vo vinutí kotvy generátora. Model nepočíta resp. nezahŕňa iné straty ako tieto.

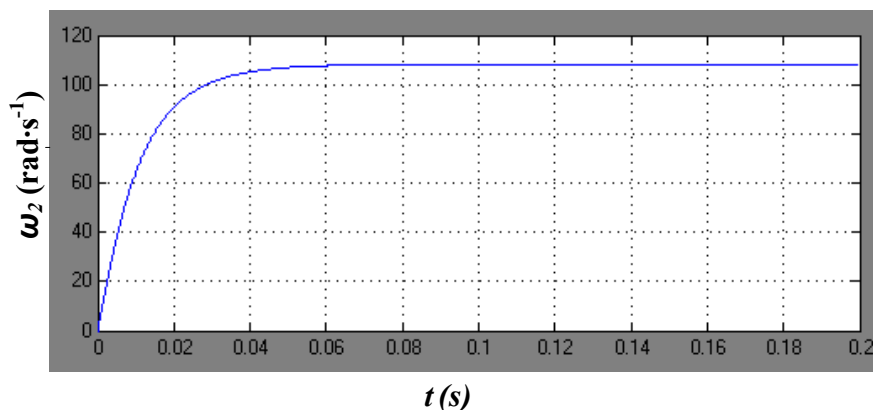
Straty v bloku modelu meniča

Straty v modeli zvyšujúceho meniča vznikajú konkrétne na dióde. Model zvyšujúceho meniča pozostáva z ideálnych prvkoch ako je indukčnosť (L), kapacita (C), ideálny spínač. Straty na týchto prvkoch sú nulové, zanedbateľné. Použitá dióda v modeli rešpektuje však reálne parametre, preto straty vznikajú pravé na tomto prvku. Tvorené sú dynamickými tak aj statickými stratami, resp. stratami pri spínaní a pri prechode prúdu diódou. Touto úvahou boli analyzované straty v meniči, konkrétne číselné vyjadrenie nie je ďalej riešenie.

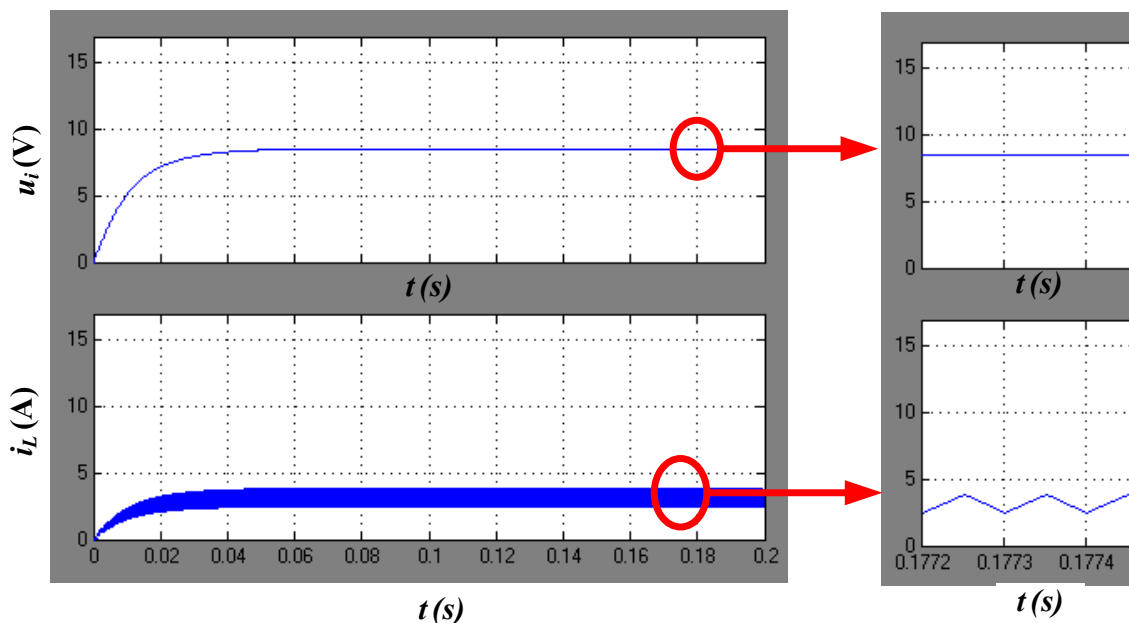
Priebehy veličín

Následujúce obrázky zobrazujú priebehy napätia a prúdu na výstupe generátora a výstupe meniča. V závislosti na zmene striedy (úpravou riadiaceho napätia U_r), dostávame na výstupe meniča rôznu veľkosť napätia a prúdu. Ako príklad bola nastavená strieda 50% (čomu odpovedá $U_r = 5 \text{ V}$)

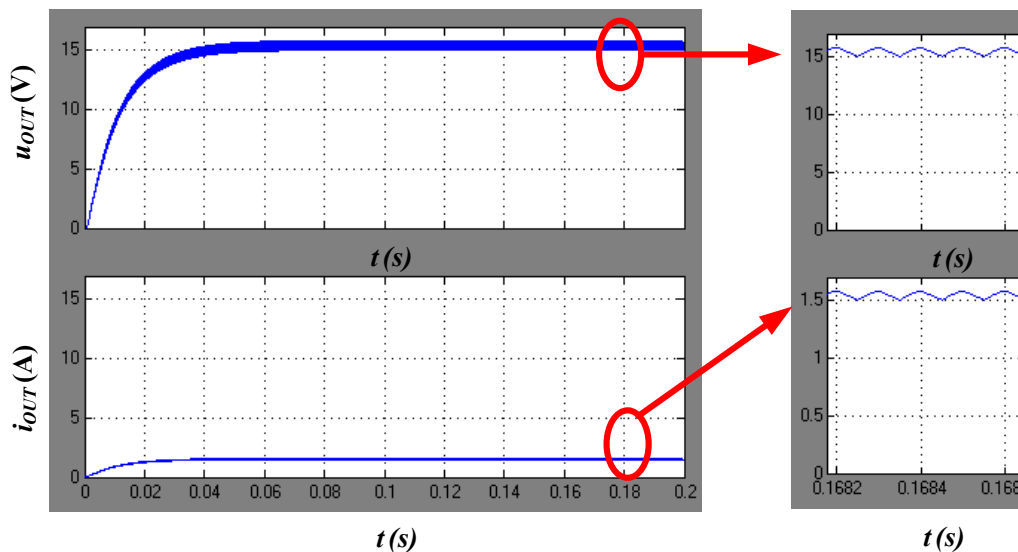
a vidíme, že menič pracuje správne. Na výstupe dostávame napätie vyššie než je vstupné, čo je základná podmienka pre správnu funkciu zvyšujúceho meniča. Napätie U_a z výstupu generátora je zvlnené v dôsledku zvlnenia prúdu I_L , ten je privádzaný do modelu generátora ako vstupný prúd I_a . Priebeh indukovaného napätia jednosmerného generátora U_i spolu s prúdom i_L zobrazený na obrázku č. 30. V tomto obrázku vidíme tiež detailne zobrazenie zvlnenia prúdu i_L . Obrázok č. 31 zobrazuje výstupné napätie a výstupný prúd z meniča. Na výstup meniča bola pripojená odporová záťaž o hodnote odporu $R = 10 \Omega$. V detaile je zobrazené zvlnenie napätia a prúdu.



Obr. 29: Priebeh uhlovej rýchlosti generátora



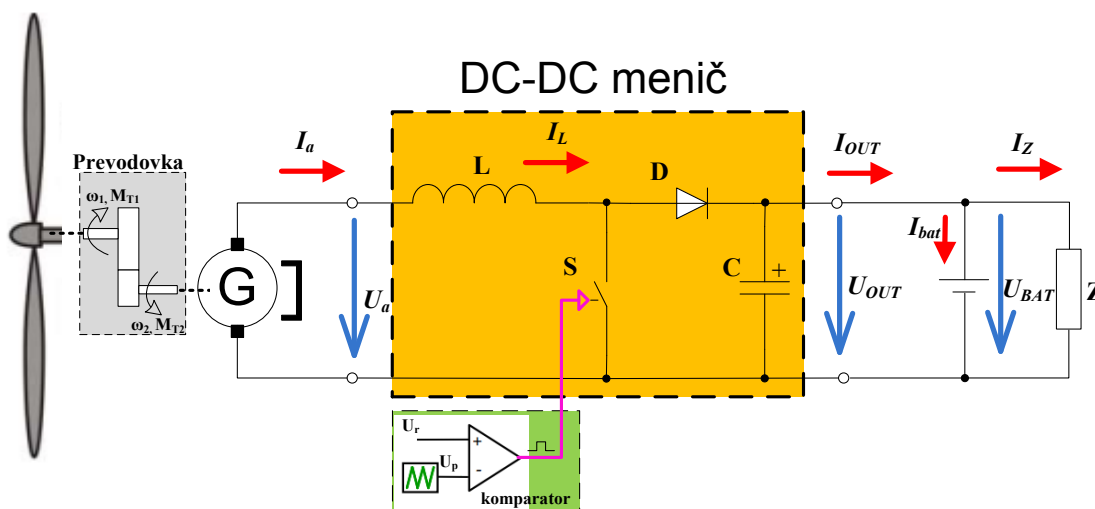
Obr. 30: Napätie a prúd na výstupe z generátora



Obr. 31: Napätie a prúd na výstupe z meniča

5.2. Simulačné overenie pre štruktúru veternej turbíny s meničom a akumulátorom

Nasledujúci obrázok č. 32 vychádza zo štruktúry simulačného modelu (pozri príloha A). Zobrazuje teda zapojenie veternej turbíny s pulzným meničom, akumulátorom a záťažou. Ide o konfiguráciu, kde je možné dobíjať akumulátor a k akumulátoru môže byť pripojená ďalšia záťaž. Zapojenie je ďalšou variantou štruktúry popisovanej v druhej kapitole. Na obrázku č. 32 vidíme vyznačené jednotlivé veličiny, ktorých hodnoty v ustálenom stave, pre zvolené rýchlosti vetra, striedu a veľkosť záťaže, sú uvedené v tabuľke 6. Táto konfigurácia slúži k overeniu správnej funkcie, a k vyhodnoteniu vznikajúcich strát. Následné boli zobrazené priebehy niektorých veličín.



Obr. 32: Štruktúra veternej elektrárne s DC generátorom, pulzným meničom a akumulátorom

Batéria v simulačnom modeli je tvorená napäťovým zdrojom $U_{bat} = 12\text{ V}$ v sérii s odporom, ktorý reprezentuje vnútorný odpor batérie $R_o = 0.01\ \Omega$. Nasledujúca tabuľka zobrazuje niektoré vybrané hodnoty v ustálenom stave, pre rôzne rýchlosti vetra a rôzne nastavenie striedy meniča. Zátťaž pripojená paralelne na akumulátor je tvorená odporom o hodnote $R = 30\ \Omega$.

Tab. 6: Hodnoty veličín v ustálenom stave pri rôznych rýchlostiach vetra, striedy, a zátťaže

strieda	90%	90%	50%	50%	20%	10%
$v\text{ (m/s)}$	5	10	10	15	15	20
$\omega_1\text{ (rad/s)}$	1,613	3,097	6,548	8,367	10,740	13,610
$M_{T1}\text{ (Nm)}$	3,938	14,160	5,944	18,190	10,630	21,900
$P_{T1}\text{ (W)}$	6,350	43,860	38,930	152,200	114,200	298,200
$\omega_2\text{ (rad/s)}$	22,582	43,358	91,672	117,138	148,820	190,540
$M_{T2}\text{ (Nm)}$	0,281	1,012	0,425	1,299	0,767	1,565
$P_{T2}\text{ (W)}$	6,350	43,860	38,930	152,200	114,200	298,200
Straty v prevodovke ($\Delta P_{JP} = P_{T1} - P_{T2}$)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_L = I_a\text{ (A)}$	3,560	12,810	5,375	16,450	9,614	19,820
$U_a\text{ (V)}$	1,157	1,173	6,297	6,360	10,190	11,570
$P_G\text{ (W)}$	4,120	15,000	33,800	105,000	97,900	229,000
Straty v generátore ($\Delta P_{JG} = P_{T1} - P_G$)	2,230	28,850	5,090	47,600	16,270	69,000
$I_{OUT}\text{ (A)}$	0,318	1,150	2,627	8,051	7,591	17,620
$U_{OUT}\text{ (V)}$	12,000	12,000	12,010	12,070	12,060	12,160
$P_m\text{ (W)}$	3,816	13,800	31,560	97,160	91,570	214,400
Straty v meniči ($\Delta P_{JM} = P_G - P_m$)	0,300	1,210	2,280	7,440	6,360	14,800
$I_{bat}\text{ (A)}$	-0,880	-0,050	1,425	6,844	6,384	16,410
$U_{bat}\text{ (V)}$	12,000	12,000	12,010	12,070	12,060	12,160
$P_{bat}\text{ (W)}$	-10,600	-0,600	17,100	82,600	77,000	200,000
$I_z\text{ (A)}$	1,199	1,200	1,201	1,207	1,206	1,216
$U_{bat} = U_z\text{ (V)}$	12,000	12,000	12,010	12,070	12,060	12,160
$P_Z\text{ (W)}$	14,380	14,400	14,430	14,560	14,550	14,800

Ako v predchádzajúcej analýze štruktúry s meničom a R zátťažou, aj v tejto štruktúre s akumulátorom vznikajú straty v jednotlivých častiach simulačnej štruktúry. Vyjadrenie a analýza týchto strát je rovnaké ako v predchádzajúcom prípade. V tabuľke 6 vidíme vyznačené hodnoty vznikajúcich strát. Tie hodnoty strát sa líšia v závislosti na zvolených rýchlostiach vetra a rôzne nastavených striedach meniča.

Straty v bloku modelu generátora

Teraz je možné overiť správnosť, kde straty v bloku generátora sú nasledovné.

Ako príklad uvediem hodnoty výkonov, ktoré platia pre, $v = 5$ m/s a strieda 90% , resp. prvý stĺpec hodnôt tabuľky č. 6:

$$\Delta P_{JG} = P_T - P_G = 6,350 - 4,120 = 2,230 \text{ W} \quad (52)$$

$$\Delta P_{JG} = R_a I_a^2 = 0,176 \cdot 3,560^2 = 2,230 \text{ W} \quad (53)$$

Podľa výsledku môžem dospieť k záveru, že straty, ktoré vznikli v modeli generátora sú skutočné joulove straty vzniknuté vo vinutí kotvy generátora. Model nepočíta resp. nezahŕňa iné straty ako tieto.

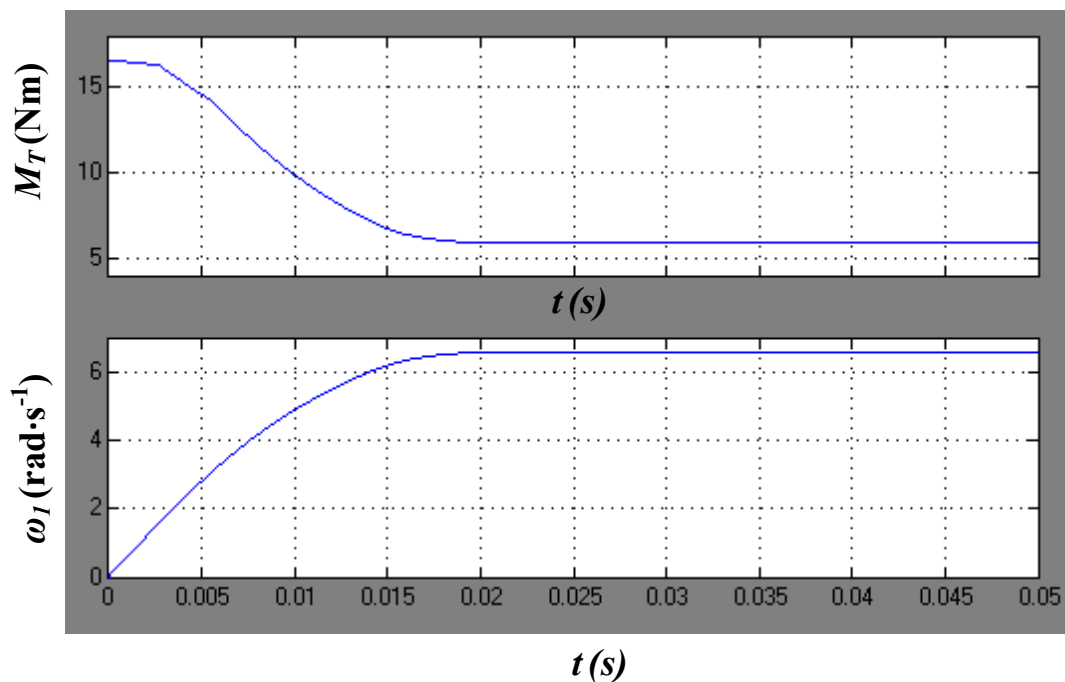
Straty v bloku modelu meniča

Aj v tomto prípade straty v modeli zvyšujúceho meniča vznikajú na dióde. Ako sme si uviedli v predchádzajúcej štruktúre bez akumulátora (pozri podkapitola č. 5.2). V tabuľke č. 6 vidíme konkrétne hodnoty strát. Následne s môžeme vyjadriť účinnosť na zvolenom príklade.

$$\eta = \frac{P_m}{P_G} \cdot 100 = \frac{97,16}{104,60} \cdot 100 = 92,89 \% \quad (54)$$

Priebehy veličín

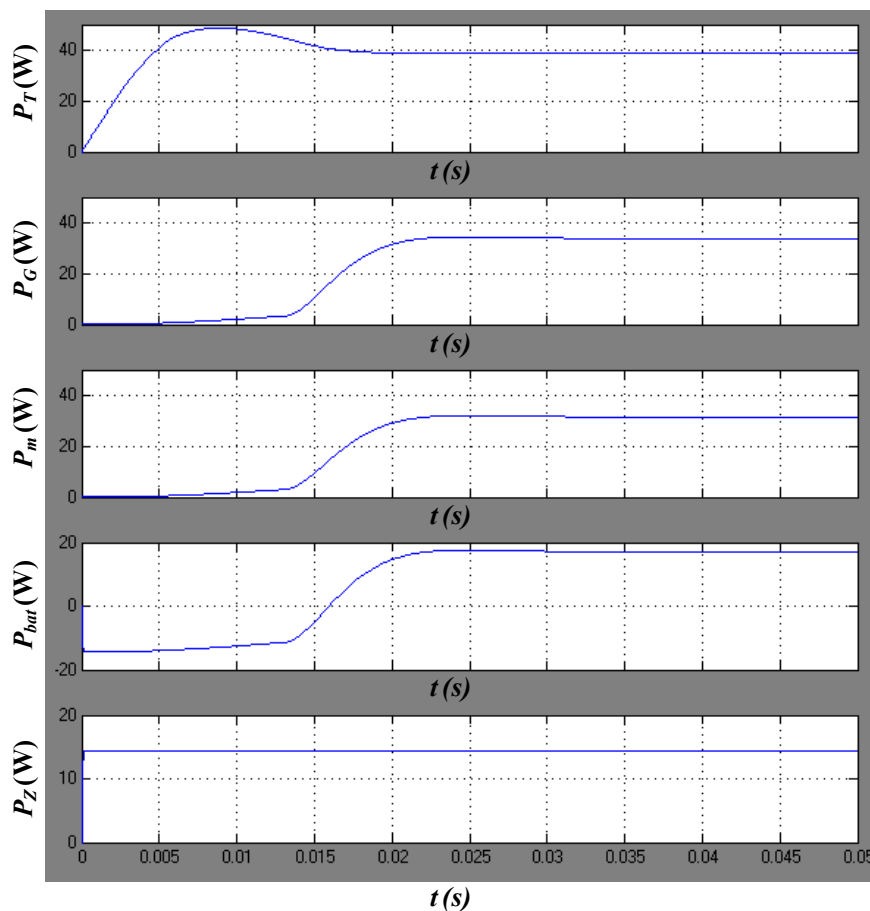
Nasledujúce obrázky nám zobrazujú priebehy napätia a prúdu na výstupe generátora resp. dynamu (pozri obrázok č. 36). Ďalej priebehy výkonov v jednotlivých častiach modelu (pozri obrázok č. 34), a tiež uhlovú rýchlosť generátora (pozri obrázok č. 35). V závislosti na zmene striedy (úpravou riadiaceho napätia U_r), dostávame na výstupe meniča rôznu veľkosť napätia a prúdu. Ako príklad sú uvedené priebehy pri nastavenej striede 50% (čomu odpovedá $U_r = 5$ V) a rýchlosti vetra $v = 10$ m/s. Napätie U_a z výstupu generátora je zvlnené v dôsledku zvlnenia prúdu i_L , ten je privádzaný do modelu generátora ako vstupný prúd I_a . Pre iné vstupné hodnoty rýchlosti vetra a striedy spínania by tieto priebehy zobrazovali veličiny obdobné, s tým rozdielom, že ich hodnoty by v ustálenom stave mali inú veľkosť, preto sú uvedené ako príklad niektoré nasledujúce priebehy.



Obr. 33: Priebeh uhlovej rýchlosti a momentu veternej turbíny

Pri počiatočnom rozbehu veternej turbíny z klukového stavu (pozri obrázok č. 33) záberovým momentom dochádza k urýchľovaniu otáčavého pohybu lopatiek, turbína koná prácu – W_T a jej výkon sa prenáša na hriadeľ generátora. Pri otáčaní rotoru však v rovnakom okamihu moment veternej turbíny klesá, dochádza totiž k relatívnemu pohybu lopatiek voči toku média (vetra). Pokiaľ je dostatok výkonu na hriadeľi, otáčky ďalej rastu a ustávajú sa na hodnote odpovedajúcej výkonu veternej turbíny a výstupnému výkonu generátora (pozri obrázok č. 34). Analýzou môžeme vyjadriť zmenu kinetickej energie sústavy veternej turbíny dW_d . Táto zmena podľa zákona o zachovaní energie je výsledkom rozdielu elementárnej energie hnacích síl veternej turbíny dW_T a energie všetkých síl odporu (naš prípad generátor) dW_G . [20]

$$dW_T - dW_G = dW_d \quad (55)$$



Obr. 34: Priebehy výkonov v jednotlivých častiach simulačného modelu veternej elektrárne

Ak budeme uvažovať s týmito zmenami za čas dt , dostaneme pohybovú rovnicu výkonovej rovnováhy

$$\frac{dW_T}{dt} - \frac{dW_G}{dt} = \frac{dW_d}{dt} \quad (56)$$

Z výkonového hľadiska

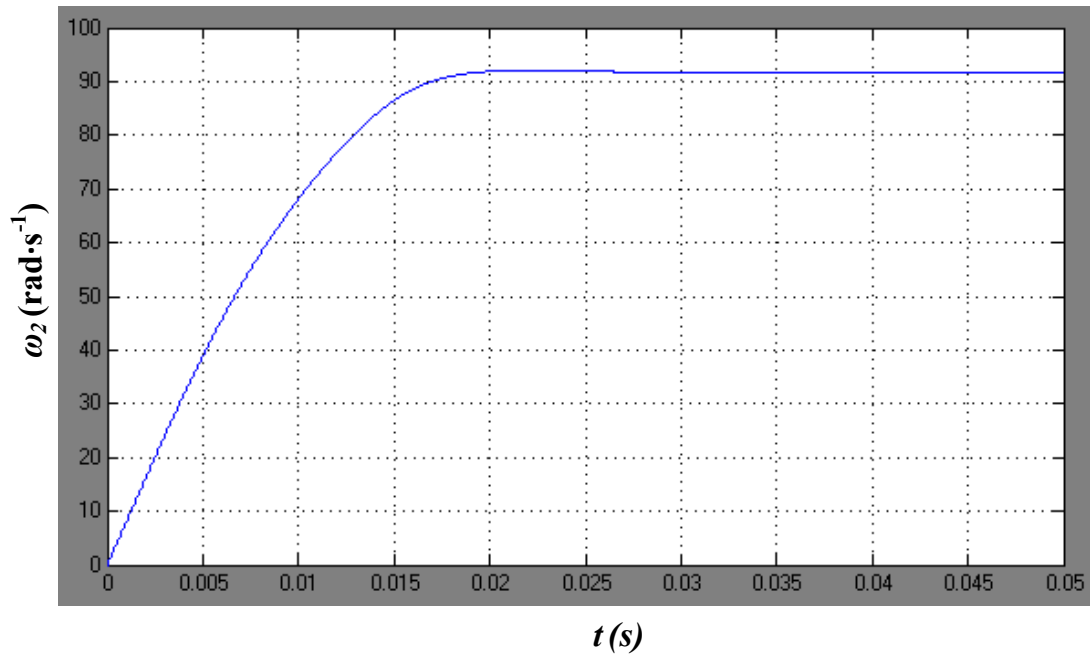
$$P_T - P_G = P_d \quad (57)$$

s ohľadom na to, že dynamicky výkon sústavy P_d charakterizuje zmenu kinetickej energie, dostávame

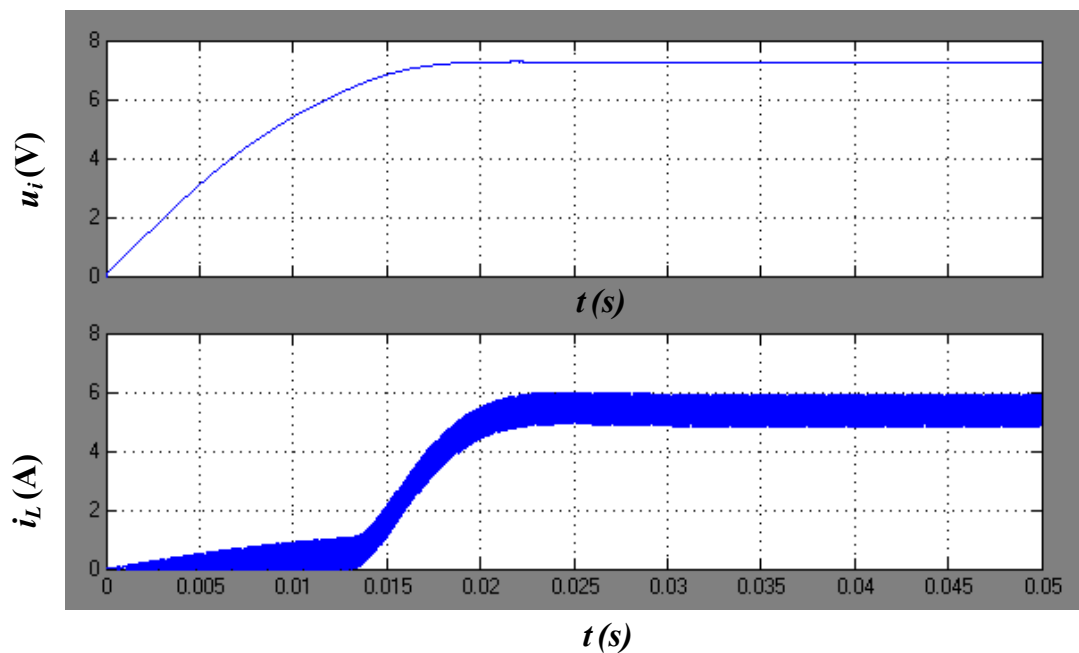
$$P_d = \frac{dW_d}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) \cong J \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (58)$$

Tento vzťah platí s uvažovaním konštantného momentu zotrvačnosti celkovej sústavy, veterná turbína - generátor [20]. V našom prípade moment zotrvačnosti veternej turbíny zanedbávame,

a preto celkový moment zotrvačnosti celej sústavy je tvorený momentom zotrvačnosti generátora. Touto analýzou bolo objasnené čo sa deje v čase keď sa rotor turbíny rozbieha. Riešiť ďalej takúto komplexnú problematiku by bolo možné iba s ohľadom na všetky mechanické konštanty veternej turbíny vrátane elektromagnetických konštánt generátora a jeho obvodu záťaže.



Obr. 35: Priebeh uhlovej rýchlosti generátora

Obr. 36: Indukované napätie u_i a prúd generátora $i_a = i_L$

6. Záver

V práci som sa zaoberal problematikou modelovania a simulácie pulzného meniča napájaného z veternej elektrárne v konfigurácii s jednosmerným generátorom v programe Matlab-Simulink. V úvode je stručne opísaný problém veternej energetiky. Následne som v práci rozobral problém malých veterných elektrární, pracujúcich hlavne ako samostatne energetické zdroje v ostrovnom režime, kde nie je možnosť pripojenia na dostupnú distribučnú elektrickú sieť. Ďalej v práci pokračujem v základnom rozdelení a popise štruktúr malej veternej elektrárne s použitím pulzného meniča a jednosmerného generátora. Hlavnou úlohou bolo k vybranej konfigurácii veternej elektrárne vytvoriť matematický model. Jednotlivé časti veternej elektrárne sú popisované matematicky samostatne, uvedené v kapitole 4. Matematický popis veternej turbíny vychádza z reálnych parametrov veternej turbíny. Tieto reálne parametre boli analyzované na základe merania výkonovej charakteristiky reálnej veternej turbíny. Výsledky som získal z doporučenej literatúry a použil ich na ďalšie spracovanie. Matematický model jednosmerného generátora je spracovaný v podkapitole 3.2. Na základe parametrov veternej turbíny bol zvolený jednosmerný generátor (typ servomotora maxon DC motor RE 75). Pri riešení konfigurácie bolo potrebné vychádzať z momentových charakteristík veternej turbíny (pozri tabuľku č. 1), kde som ich prepočtom určil charakteristiky generátora, tzn. vzájomné závislosti napätia a prúdu pri rôznych otáčkach a rôznych veterných režimoch. V reálnej konfigurácii pre spojenie veternej turbíny a generátora je potrebná prevodovka. Tak isto aj v matematickom modeli veternej turbíny bolo potrebné počítať s prevodovkou, resp. prevodom. Bližší matematický popis pulzného meniča je uvedený v podkapitole 3.3. Na základe matematického popisu všetkých častí konfigurácie malej veternej elektrárne bol vytvorený simulačný model. Tak ako aj v predchádzajúcom prípade, celkový simulačný model pozostáva z jednotlivých blokov charakterizujúcich jednotlivé časti konfigurácie veternej elektrárne. Presný popis je uvedený v podkapitole 4.2 a celková simulačná štruktúra je uvedená v prílohe A. Posledná časť práce sa zaoberá overením správnej funkčnosti celej simulovanej štruktúry. Jedna sa o simulačné overenie spojenia jednotlivých komponentov ako celku výslednej štruktúry a overenie spolupráce a funkčnosti v ustálenom stave. Následne boli analyzované straty vznikajúce v jednotlivých častiach simulačnej štruktúry. Ako najjednoduchší prípad bola simulovaná štruktúra veternej elektrárne s pulzným meničom a odporovou záťažou. V podkapitole 5.1 je uvedené vyjadrenie strát vznikajúcich v jednotlivých častiach veternej elektrárne, a to konkrétne straty v bloku generátora, straty v bloku meniča, straty v prevodovke sú zanedbateľné. Podľa výsledkov simulácie zobrazených v tabuľke č. 5 straty v modeli generátora tvoria Joulove straty a tie vznikajú na odpore vinutia generátora R_a prechodom prúdu I_a . Model zvyšujúceho meniča pozostáva z ideálnych prvkov ako je indukčnosť (L), kapacita (C), ideálny spínač. Straty na týchto prvkoch sú zanedbateľné. Použitá dióda v modeli meniča rešpektuje však reálne parametre, preto straty vznikajú práve na tomto prvku. Ďalej boli zobrazené niektoré priebehy veličín. Druhou overovanou štruktúrou bolo spojenie veternej turbíny pulzného meniča s akumulátorom a záťažou. Jedna sa o štruktúru, kde je možné dobíjať akumulátor a k akumulátoru je pripojená ďalšia záťaž. Ako v predchádzajúcom tak aj v tomto prípade boli analyzované straty

v jednotlivých častiach simulovanej štruktúry. Vznikajúce straty sú analyzované v ustálenom stave a závisia na zvolených rýchlostiach vetra a tiež v závislosti na zmene striedy spínania pulzného meniča. Vyjadrenie strát je uvedené a popísané v podkapitole 5.2. Následne boli zobrazené niektoré priebehy veličín. Na obrázku č. 34 (priebeh výkonov) je vidieť, že pri rozbehu rotoru turbíny sa prejavuje dynamicky výkon simulovanej sústavy P_d . Priebehy a hodnoty veličín uvedené v práci boli získané za pomoci simulácie modelu veternej elektrárne v programe Matlab -Simulink.

Pomocou vytvoreného simulačného modelu je možné overiť viacero variant konfigurácie veternej elektrárne. Ďalej je možné k modelu navrhnúť vhodnú istiacu a regulačnú techniku a sledovať vplyv porúch a výkyvov sily vetra na pripojenú záťaž. Reguláciou by bolo možné presne regulovať dobíjací prúd resp. regulovať dobíjanie alebo reguláciou meniča upravovať zaťaženie generátora tak, aby došlo k maximálnemu využitiu výkonu veternej turbíny. Ďalšou možnosťou využitia malej veternej elektrárne do budúcnosti je spojenie s ďalším alternatívnym zdrojom energie napríklad v spojení s fotovoltaiickým systémom alebo palivovými článkami na báze vodíkových systémov. Výskum sa neustále zameriava a zaoberá spojením takýchto technológií. Tieto technológie umožňujú vytvoriť napr. autonómny zdroj energie, ktorého dodávka energie poslúži odľahlým oblastiam, hlavne tam kde nie je možnosť pripojenia k distribučnej elektrickej sieti. Preto sa vo výskume týchto systémov a technológií vo veľkej miere využívajú rôzne simulačné nástroje (napríklad Matlab – Simulink), aby sa overili reakcie na rôzne poruchy, prípadne sa sledovalo správanie celého systému v rôznych prevádzkových režimoch a pod.

Literatúra

- [1] VETERNÉ ELEKTRÁRNE: Domáce veterné elektrárne. In: Solarsystems: Veterná energia [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.solarsystems.sk/sk/tepelne-cerpadla-a-veterne-elektrarne>
- [2] MALÉ TURBÍNY. In: Veterná energia [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.seps.sk/zp/fond/2002/vietor/vietor.html>
- [3] KAČOR, P., S. MIŠÁK, R. HOLČÁKOVÁ a L. PROKOP. Analýza větrné elektrárny s vertikální osou otáčení. Elektrevue. 2010, č. 123, s. 1-3. DOI: ISSN 1213 - 1539.
- [4] MOTLÍK, J. a kol. Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice. Praha: ČEZ, 2007. 181 s. ISBN 978-80-239-8823-9.
- [5] RYCHETNÍK, V.: Větrné motory. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1995. ISBN 80-7078-281-1.
- [6] Wind Turbine Permanent Magnet DC Motors. In: *Green Energy BLOG* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://cleangreenenergyzone.com/wind-turbine-permanent-magnet-dc-motors/>
- [7] Permanent Magnet DC Generator. In: *Alternative Energy Tutorials* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/pmdc-generator.html>
- [8] Types of Generators used for Wind Turbines. In: *CENTURION ENERGY: Alternative Energy* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://centurionenergy.net/generator-types>
- [9] WIND TURBINES. In: *WIND ENERGY: RENEWABLE ENERGY* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://energybible.com/wind_energy/wind_turbines.html
- [10] Schulz, Heinz. Savoniův rotor. Ostrava-Plesná : HEL, 2005. 80-86167-26-7.
- [11] Super-compact brushless AC servo motors. GlobalSPEC [Online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.globalspec.com/featuredproducts>.
- [12] Wind Turbine. MathWorks: Documentation Center [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbine.html;jsessionid=354aca3aa87b2dbdc16937540c4b>
- [13] Neborák, I.: Elektrické regulované pohony I. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [14] Maxon motor: The Electronic Catalog. 2002/2003, 79,193.
- [15] POTOČKA, Miroslav. Vybrané statí z výkonové elektroniky: skriptum FEKT. Svazek II. VUT Brno, 2005.

-
- [16] HAUKE, Brigitte. Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage: Low Power DC/DC Application. *Texas Instruments: Application Report*. 2009, s. 1-7.
 - [17] KAČOR, P. Výkonová charakteristika větrného motoru. International Scientific Conference Electric Power Engineering: Proceedings of the 13 th. 2012 Brno, s. 633-637.
 - [18] NOVÁK, D., T. MLČÁK a R. HRBÁČ. Měření výkonové křivky prototypu vertikální větrné turbíny. *International Scientific Conference Electric Power Engineering: Proceedings of the 13 th*. 2012 Brno, s. 517-520.
 - [19] 2-D Lookup Table. MathWorks: Documentation Center [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/directlookuptablend.html>
 - [20] Neborák, I.: Mechatronické systémy. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava, 2013.

Zoznam príloh

PRÍLOHA A: Simulačná štruktúra veternej turbíny s DC generátorom a pulzným meničomI

PRÍLOHA A: Simulačná štruktúra veternej turbíny s DC generátorom a pulzným meničom

